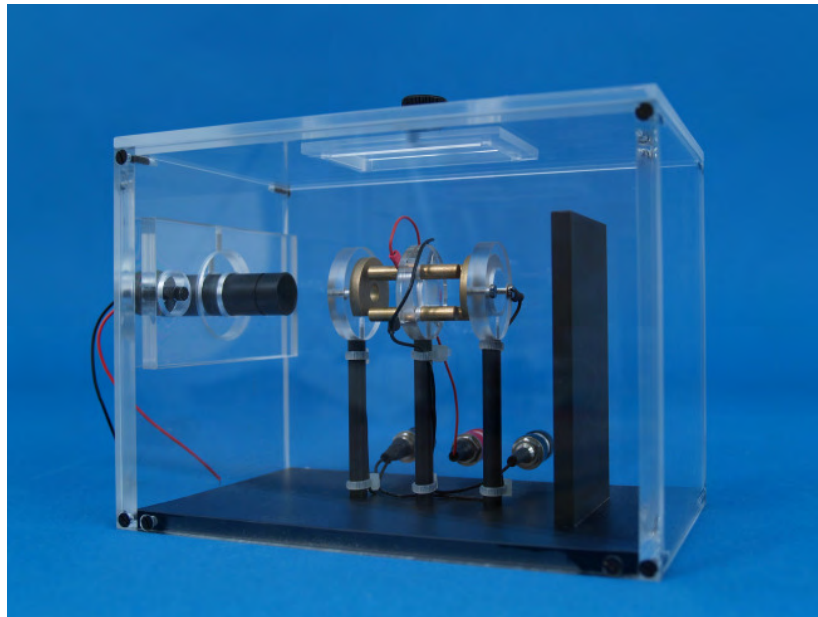


Moderne Modellexperimente als Schülerprojekt

- Paulfallen und Teilchenbeschleuniger -



Staatsexamensarbeit im Fachbereich Physik
Johannes Gutenberg - Universität Mainz
Von Nadine Coberger

Gutachter
PD Dr. Klaus Wendt
PD Dr. Thomas Trefzger

Mainz, den 21. Februar 2007

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Teilchenbeschleuniger	5
2.1.1 Geschichtlicher Kontext	5
2.1.2 Grundprinzipien	7
2.1.3 Gleichspannungsbeschleuniger	10
2.1.4 Der Linearbeschleuniger	12
2.2 Die Paulfalle	18
2.2.1 Geschichtlicher Kontext	18
2.2.2 Grundprinzipien	19
2.2.3 Die zweidimensionale lineare Falle	21
2.2.4 Die dreidimensionale punktsymmetrische Falle	26
2.2.5 Das PALLAS-Experiment	27
2.3 Quadrupolbeschleuniger	29
2.3.1 Geschichtlicher Hintergrund	29
2.3.2 Funktionsweise	29
3 Experimenteller Aufbau der Teilchenbeschleunigermodelle	31
3.1 Erstes Modell - Punktsymmetrische Paulfallenreihe	31
3.2 Zweites Modell - Segmentierte lineare Paulfalle	34
3.3 Drittes Modell - Alvarezstruktur	38
4 Einsatz der Modellexperimente im Schülerprojekt	39
4.1 Konzept des Schülerprojektes	39
4.1.1 Voraussetzungen	39
4.1.2 Zeitlicher Rahmen	41
4.2 Projektbausteine	43
4.2.1 Einführungsvortrag	43
4.2.2 Bau einer Paulfalle	45
4.2.3 Modell eines Teilchenbeschleunigers	47
4.2.4 Anwendungen eines Teilchenbeschleunigers	49

4.3 Eindrücke der Schüler	59
5 Zusammenfassung und Ausblick	63
Literaturverzeichnis	67
A Anhang	71
A.1 Arbeitsblätter	71
A.1.1 Arbeitsplan zum Bau einer Paulfalle	73
A.1.4 „Bringen Sie die Teilchen auf Trab!“	75
A.1.3 „1 Gramm Antimaterie, bitte!“	79
A.1.2 Ionenkanone gegen Krebs	83
A.2 Schülerskript	87
A.2.1 Die Paulfalle oder „Verdammt ich bin gefangen!“	89
A.3 Einführungsvorlesung	95
A.4 Die Paulfalle aus dem Supermarkt	109
B Dankeschön	111
C Erklärung	113

Tabellenverzeichnis

2.1	Linear - (SLC) und Kreisbeschleuniger und deren technische Daten . .	6
2.2	Die vier fundamentalen Kräfte der Natur	8
4.1	Zeitlicher Ablauf des Schülerpraktikums	42

Abbildungsverzeichnis

1.1	Demonstrationsmodell zur Teilchenbeschleunigung	3
2.1	Stanford Linear Accelerator Center	7
2.2	Quadrupolfeld und Quadrupolduplett	9
2.3	Prinzip der starken Fokussierung	10
2.4	Gleichspannungsbeschleuniger	11
2.5	Tandem - Beschleuniger	12
2.6	Linearbeschleuniger	13
2.7	Wideröe - Beschleuniger an der GSI	14
2.8	Zylindrischer Resonator mit TM01 - Welle	16
2.9	Wellenreiter	17
2.10	Alvarez - Beschleunigung	17
2.11	Nobelpreisverleihung 1989	18
2.12	Oszillierendes Quadrupolpotential	21
2.13	Elektrodenanordnung und Äquipotentiallinien der linearen Paulfalle . .	22
2.14	Mikro - und Makrobewegung	24
2.15	Stabilitätsdiagramm der Mathieu'schen Differentialgleichung	25
2.16	Elektrodenanordnung der punktsymmetrischen Falle	26
2.17	PALLAS - Experiment	27
2.18	Kristalline Struktur im Speicherring	27
2.19	RFQ - Resonators	30
3.1	Erstes Modell	31
3.2	Segmente des ersten Modells	32
3.3	Segmente des zweiten Modells	34
3.4	Zweites Modell	35
3.5	Beschleunigungsprinzip im zweiten Modell	36
3.6	Verwendetes Netzgerät	37
3.7	Drittes Modell	38
4.1	Bausteine in der Qualifikationsphase des Grundfaches	40
4.2	Bausteine in der Einführungsphase des Leistungsfaches	40
4.3	Quadrupolpotential in einer Paulfalle	43
4.4	Punktsymmetrische Falle für Makroteilchen	45
4.5	Lineare Falle für Makroteilchen	45
4.6	Selbstgebaute punktsymmetrische Paulfalle	46

4.7	Schüler beim selbstständigen Fallenbauen	46
4.8	Schüler beim Testen der selbstgebaute Fallen	47
4.9	Schüler beim Testen des Teilchenbeschleunigermodells	48
4.10	Dan Browns „Illuminati“	50
4.11	Nebelkammer	51
4.12	Beschleunigerkomplex am CERN	52
4.13	Schema zur Antiprotonenproduktion	53
4.14	Tiefendosisprofil	55
4.15	Patientenvorbereitung	56
4.16	Vergleich der Ionen - und Photonenbestrahlung	57
4.17	Rasterverfahren	58
4.18	Schüler beim Photographieren	60
5.1	Mikrobewegung in den selbstgebaute Paulfallen	64
5.2	Teilchenbewegung im Teilchenbeschleunigermodell	64

1 Einleitung

Bereits in den ersten Jahrzehnten des 20ten Jahrhunderts wurden Beschleuniger für geladene Teilchen entwickelt und haben sich schnell als leistungsfähige Werkzeuge in der Grundlagenforschung und bald darauf auch in vielen industriellen und medizinischen Anwendungen herausgestellt. Die große kinetische Energie, die in solchen Beschleunigern einem Teilchen übertragen werden kann, wird in der physikalischen Grundlagenforschung zum Beispiel dazu eingesetzt, die fundamentalen Bestandteile unseres Universums, also die Teilchen aus denen alles um uns besteht, aufzuspüren und deren Eigenschaften zu studieren. Der Einsatz von Teilchenbeschleunigern in der Forschung stellt jedoch heutzutage insgesamt nur einen kleinen Teil des Anwendungsspektrums dar. Der Großteil aller Teilchenbeschleuniger wird in der Industrie und Medizin genutzt, wo sie etwa zur Härtung von Oberflächen, als Treiber für Gaslaser und Freie - Elektronen - Laser, zur Sterilisierung von Nahrungsmitteln, zur Dotierung von Halbleitermaterialien, zur Tumorbehandlung von Krebspatienten oder einer Vielzahl anderer Anwendungen eingesetzt werden.

Die kontrollierte und verlustarme Beschleunigung eines Teilchenensembles durch elektromagnetische Felder ist eng verwandt mit dem Einfangen und Speichern von Teilchen in eben diesen Feldern. Neben Beschleunigern gehören heute auch Teilchenfallen zu wichtigen und unverzichtbaren Handwerkszeugen der modernen Physik des 20ten Jahrhunderts, wobei beide auf ähnlichen Prinzipien beruhen. Teilchenfallen waren und sind entscheidende Voraussetzungen für die Fortschritte in der Atom - und Quantenphysik, da es mit ihnen möglich wurde, wenige bzw. einzelne Teilchen kontrolliert und quasi wechselwirkungsfrei über einen langen Zeitraum in einem kleinen Raumbereich zu fixieren und zu studieren. Zuvor konnten Untersuchungen nur an großen Ensembles von Teilchen und in sehr begrenztem Zeitrahmen gemacht werden. Zusätzlich waren die Resultate dabei durch die Wechselwirkungen der Teilchen untereinander mit Unsicherheiten behaftet. Für die Entwicklung der Ionenfalle wurde Wolfgang Paul mit seinen Kollegen Hans Dehmelt und Norman Ramsay 1989 der Nobelpreis verliehen, was die große Bedeutung dieser Entwicklung für die Wissenschaft widerspiegelt.

Beide physikalischen Werkzeuge - sowohl der Teilchenbeschleuniger als auch die Ionenfalle - sind bedeutungsvoll und faszinierend und aktuell in ihren Anwendungsgebieten, gehören aber leider nicht zu den Themen, die im Unterricht oder in Schulbüchern zu finden sind. Dies ist um so bedauerlicher, da es für Schüler interessant und lehrreich wäre, mehr zu diesen Themenkomplexen zu erfahren. Neben den traditionellen Schulexperimenten könnten sie damit z.B. einen Einblick in die moderne Forschungslandschaft

und deren technische Anwendungen erhalten.

Wie aber ist es möglich, diese beiden auf den ersten Blick sehr unterschiedlichen Themen zu verknüpfen und in einen attraktiven Schulunterricht einzubinden? Wie können etwa aufwändige und kompliziert anmutende Beschleunigungseinrichtungen oder Ionenfallen, die beide in der Regel unsichtbare Teilchen beschleunigen bzw. einfangen, für Schüler zugänglich gemacht werden?

Da sowohl das Grundprinzip der Beschleuniger als auch das der Ionenfallen auf elektromagnetischen Kräften beruht, die geladene Teilchen entweder beschleunigen oder einfangen, ist diese Verknüpfung grundsätzlich gut möglich. Darüber hinaus bietet sie einen attraktiven und motivierenden Zugang zu der Wirkung von elektromagnetischen Feldern im Unterricht. Die Verbindung von Teilchenbeschleunigung und Ionenfallen in Form eines sogenannten Quadrupolbeschleunigers wurde sogar in den 70iger Jahren wirklich realisiert. Man verwendet dabei leicht modifizierte Ionenfallensegmente, die geladene Teilchen sowohl fokussieren als auch beschleunigen können. Dieser Ansatz wurde in einer mechanisch vereinfachten Form für das in der vorliegenden Staatsexamensarbeit entwickelte Projekt benutzt. Sowohl Beschleuniger als auch Ionenfalle werden als Demonstrationsexperiment für ein Schulprojekt oder eine populärwissenschaftliche Präsentation vorgestellt und mögliche Wege der Behandlung im Unterricht werden aufgezeigt.

In dem hier erarbeiteten Projekt erhalten die Schüler die Möglichkeit, selbständig an dem im Rahmen der Staatsexamensarbeit entwickelten Teilchenbeschleunigermodell zu experimentieren. Im Rahmen einer AG wäre ein eigenständiger Aufbau eines solchen Modells sogar prinzipiell möglich, wird aber wahrscheinlich an der Komplexität der mechanischen Komponenten bzw. der notwendigen Elektronik scheitern. Das Modell veranschaulicht, wie geladene Teilchen über zeitlich variierende Potentiale gefangen bzw. beschleunigt werden können. Dabei fördert die Reduzierung einer Beschleunigeranlage auf ein überschaubares „Table - Top - Modell“ und die Verwendung von makroskopischen Teilchen, wie beispielsweise Kakaopulver oder Bärlappsporen, die mithilfe eines Lasers gut sichtbar gemacht werden können, das Verständnis der Schüler. Grundbestandteile der einzelnen Beschleunigersegmente des entwickelten Modells sind lineare Paulfallen, von denen mehrere hintereinandergereiht sind (vgl. Abb. 1.1.). In den Paulfallen werden die Makroteilchen zunächst gefangen und dann über eine angelegte Spannung gezielt von Segment zu Segment geschoben. Dieser Schritt entspricht einer „Zeitlupenaufnahme“ des Ablaufs in einem „echten“ Teilchenbeschleuniger.

Die Verwendung der Ionenfallen als Beschleunigersegmente zeigt dabei die enge Verknüpfung der Physik von Teilchenbeschleuniger und Ionenfalle. Die Schüler lernen in dem Projekt neben dem Beschleunigerprinzip die Hintergründe der Speicherung geladener Teilchen im Wechselfeld einer Paulfalle kennen. Zudem erhalten die Schüler die

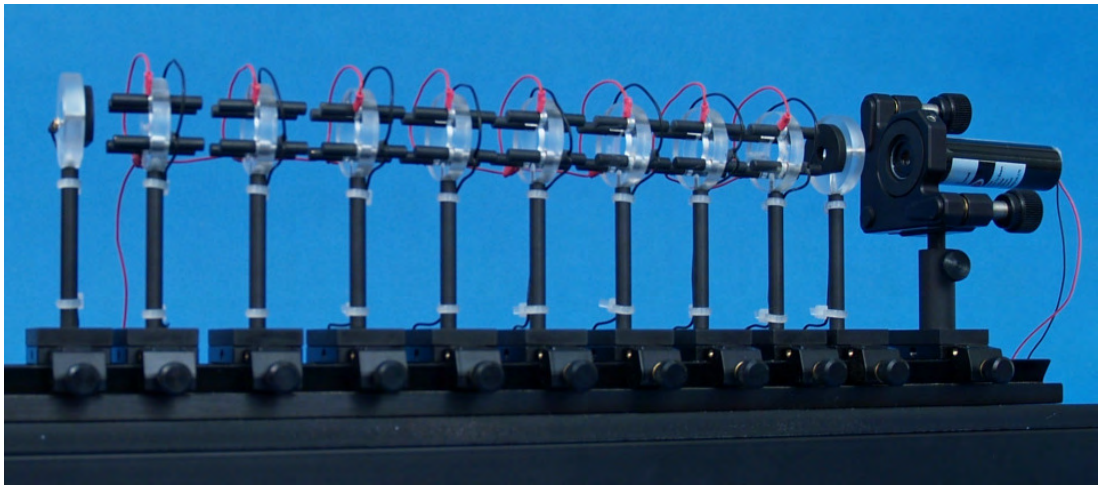


Abbildung 1.1: Entwickeltes Demonstrationsmodell zur Teilchenbeschleunigung

Möglichkeit eigene einfache Fallen aufzubauen, die den theoretischen Teil ergänzen und beleben und die problemlos in der Schule betrieben werden können.

Schülerprojekttag und Experimente zu Paulfallen wurden schon vor dem in dieser Staatsexamensarbeit vorgestellten Projekt an der Johannes Gutenberg - Universität in Mainz durchgeführt. Interessierte Schülergruppen erhielten dabei einen Einblick in die Grundlagen der Paulfalle und konnten die bestehenden Aufbauten testen. Neben dem Erlernen der Grundlagen einer Falle konnten die Schülergruppen an diesen Projekttagen selbst einfache Fallen aufbauen. Der Aufbau der eigenen Paulfallen war und ist dabei stark an die Pädagogische Prüfungsarbeit zum zweiten Staatsexamen von Annette Schmitt mit dem Titel „Die Paulfalle als Schulexperiment - Eine Einführung in die Atomphysik“ angelehnt [Sch01]. In dieser Arbeit wird die Paulfalle in einer Unterrichtsreihe als ein Schlüsselexperiment und Hilfsmittel der aktuellen Atomphysik eingeführt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dieses Projekt für Schüler darüber hinaus auf ein Beschleunigermodell erweitert.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich grundsätzlich in fünf Teile. Im zweiten Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen zu Teilchenbeschleunigern und Paulfallen dargestellt. Anschließend wird im dritten Kapitel die Entwicklung des Teilchenbeschleunigermodells dokumentiert und im vierten Kapitel wird beschrieben, wie die entwickelten Modellexperimente in einem Schülerprojekt eingesetzt werden. Schließlich gibt das letzte Kapitel eine reflektierte Zusammenfassung des entwickelten Projektes und einen Ausblick auf mögliche weiterführende Projekte.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zu Teilchenbeschleunigern und Ionenfallen, speziell der Paulfalle, beschrieben. Dabei wird klar, dass beide auf ähnlichen Grundprinzipien beruhen. Hierbei werden elektromagnetischen Kräfte eingesetzt, die geladene Teilchen entweder in einem Beschleuniger beschleunigen oder in einer Falle festhalten. In diesem Kapitel wird zudem der Quadrupolbeschleuniger beschrieben, der eine direkte Verbindung beider Strukturen darstellt. Dieser beschleunigt und fokussiert Teilchenstrahlen mithilfe abgewandelter Paulfallensegmente. Er ist daher - mit Einschränkungen - eine Realisierung des Teilchenbeschleunigermodells, das im Rahmen dieser Staatsexamensarbeit entwickelt wurde.

2.1 Teilchenbeschleuniger

2.1.1 Geschichtlicher Kontext

„Schon lange war es mein Wunsch, für Experimente Atome und Elektronen in genügender Menge und mit Energien einzusetzen, die über den Energien der α - und β - Teilchen aus radioaktiven Substanzen liegen. Ich hoffe, dass mein Wunsch bald erfüllt wird“ [BFB02]. Dieser von E. Rutherford im Jahre 1927 in einem Vortrag vor der Royal Society in London formulierte Ausspruch ist wohl stellvertretend für viele experimentelle Kern - und Teilchenphysiker jener Zeit.

Eine heute noch gültige Motivation für immer höhere Energien und gut kontrollierte Teilchenstrahlen gibt [Wil96]: Das Interesse an den Ursprüngen und den Bestandteilen des Universums. Um diese winzig kleinen Konstituenten und Strukturen, deren Dimensionen teilweise noch weit kleiner als Femtometer sind, zu erforschen, benötigt man Strahlung, deren Wellenlänge kleiner ist als die Dimension des zu beobachtenden Objekts. Nach dem Materiewellenpostulat von de Broglie bedeutet dies, dass man den Teilchen hohe Energien zuführen muss, um so kleine Wellenlängen und damit hohe Frequenzen zu erreichen. Schon um Strukturen von der Größe 10^{-15} m, etwa Protonen oder Neutronen zu beobachten, wird eine enorme Energie von

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1,25 \text{ GeV}$$

benötigt [Wil96, Dem98].

Weiterhin hat man in der Teilchenphysik ein großes Interesse an der Erzeugung von exotischen, in der Natur üblicherweise nicht beobachtbaren Teilchen. Hierzu können

beispielsweise zwei Teilchenstrahlen zur Kollision gebracht und die resultierenden Produkte in Detektoren beobachtet werden. Die Stoßpartner benötigen dabei zur Erzeugung von Teilchen jedoch eine gewisse Mindestenergie. Sie liegt bei der doppelten Ruheenergie des zu erzeugenden Teilchens, da dieses nie ohne sein Antiteilchen erzeugt werden kann. Für das Proton beispielsweise liegt die Ruheenergie schon bei 938 MeV.

Im Laufe des 20ten Jahrhunderts sind verschiedene Maschinen zur Beschleunigung von Teilchen entwickelt worden. Die erste Realisierung eines Teilchenbeschleunigers wurde 1932 von Cockcroft und Walton in Form eines Gleichspannungsbeschleunigers (vgl. Kap. 2.1.3) mit hohen Gleichspannungen umgesetzt. Jedoch stellt die Erzeugung hinreichend großer Gleichspannungen technisch ein erhebliches Problem dar und ist begrenzt auf einige MV. Diese Spannung, die auch die Maximalenergie der Teilchen begrenzt, ist jedoch für viele Anwendungen bei weitem nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurden nahezu zeitgleich Teilchenbeschleuniger mit hochfrequenten Wechselspannungen sowie Anlagen, bei denen die Teilchen auf einer Kreisbahn beschleunigt werden, konzipiert, mit denen größere Energien erreicht werden konnten. Wie rasant die Entwicklung von Teilchenbeschleunigern mit immer größeren Energien tatsächlich war und immernoch ist, wird deutlich, wenn man die erreichbare Maximalenergie der jeweiligen Beschleuniger betrachtet. Diese konnten seit 1932, beispielsweise für Protonen, etwa alle sechs Jahre um den Faktor 10 gesteigert werden [BFB02]. Während der Cockcroft - Walton - Beschleuniger im Jahre 1932 eine Maximalenergie von 0,8 MeV lieferte, so wird der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf Ende 2007 mit einer Maximalenergie von 14 TeV, also mehr als einen Faktor 10^7 darüber, in Betrieb gehen.

Eine kleine Auswahl von Beschleunigern und deren technischen Daten sind in Tab. 2.1 aufgelistet. Dabei ist der SLC am Stanford Linear Accelerator Center (vgl. Abb. A.1) der größte Linearbeschleuniger der Welt und bringt die Teilchen auf einer Länge von 3 km auf Energien bis zu 50 GeV. Bei den anderen aufgelisteten Beschleunigern handelt es sich jeweils um Kreisbeschleuniger und alle Daten sind den jeweiligen Homepages der Forschungseinrichtungen entnommen.

Beschleuniger	Ort	Energie	Teilchen	Länge bzw. Umfang
SLC	SLAC, Stanford	50 GeV	e / \bar{e}	3 km
HERA	DESY, Hamburg	30 GeV / 920 GeV	$e (\bar{e}) / p$	6,3 km
LHC	CERN, Genf	14 TeV / 1150 TeV	$p (\bar{p}) / \text{Bleikerne}$	27 km
Tevatron	Fermilab, Chicago	150 GeV	$p (\bar{p})$	6,4 km

Tabelle 2.1: Linear - (SLC) und Kreisbeschleuniger und deren technische Daten

Teilchenbeschleuniger haben sich heute zu leistungsfähigen Werkzeugen in der Grund-



Abbildung 2.1: Stanford Linear Accelerator Center in Stanford: Die Teilchen werden auf einer Länge von 3 km auf 50 GeV beschleunigt.

lagenforschung und in vielen industriellen und medizinischen Anwendungen entwickelt. Neben vielfältigsten Untersuchungen über den Aufbau der Materie und die Wechselwirkung zwischen ihren fundamentalen Konstituenten werden sie als Treiber für Gaslaser und Freie - Elektronen - Laser, zur Härtung von Oberflächen mit Ionen, zur Sterilisierung von Nahrungsmitteln und in der Medizin beispielsweise zur Tumorbehandlung von Krebspatienten angewendet [BFB02]. Dieses breite Anwendungsspektrum wird später in Kap. 4.2.4 ausführlicher dargestellt.

2.1.2 Grundprinzipien

Im diesem Kapitel sollen sowohl das Grundprinzip der Beschleunigung als auch das der Strahlführung beschrieben werden.

Beschleunigung

Da die Teilchen in den meisten Beschleunigern Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit erreichen, müssen zur theoretischen Beschreibung der Teilchenkinematik relativistische Formeln verwendet werden. Für die relativistische Energie eines Teilchens, die im Teilchenbeschleuniger erreicht wird, gilt:

$$E = \sqrt{m_0^2 \cdot c^2 + c^2 \cdot p^2} \quad . \quad (2.1)$$

Diese Formel zeigt, dass eine Energieerhöhung gleichbedeutend mit einer Impulserhöhung ist. Weiterhin besagt das 2. Newton'sche Axiom, dass der Impuls geändert werden kann, wenn eine Kraft wirkt. Dazu könnten prinzipiell alle, nach heutigem Wissen existierenden, fundamentalen Kraftfelder eingesetzt werden: das Gravitationsfeld, das elektromagnetische Kraftfeld, das starke und das schwache Kraftfeld. Ein Vergleich ihrer Eigenschaften ist in Tab. 2.2 gegeben.

Kraft	relative Stärke	Reichweite [m]	betroffene Teilchen
Gravitation	$6 \cdot 10^{-39}$	∞	alle Teilchen
Elektromagnetismus	$\frac{1}{137}$	∞	geladene Teilchen
starke Kraft	≈ 1	$10^{-15} - 10^{-16}$	Hadronen
schwache Kraft	10^{-5}	$\ll 10^{-16}$	Hadronen und Leptonen

Tabelle 2.2: Die vier fundamentalen Kräfte der Natur (entnommen aus [Wil96])

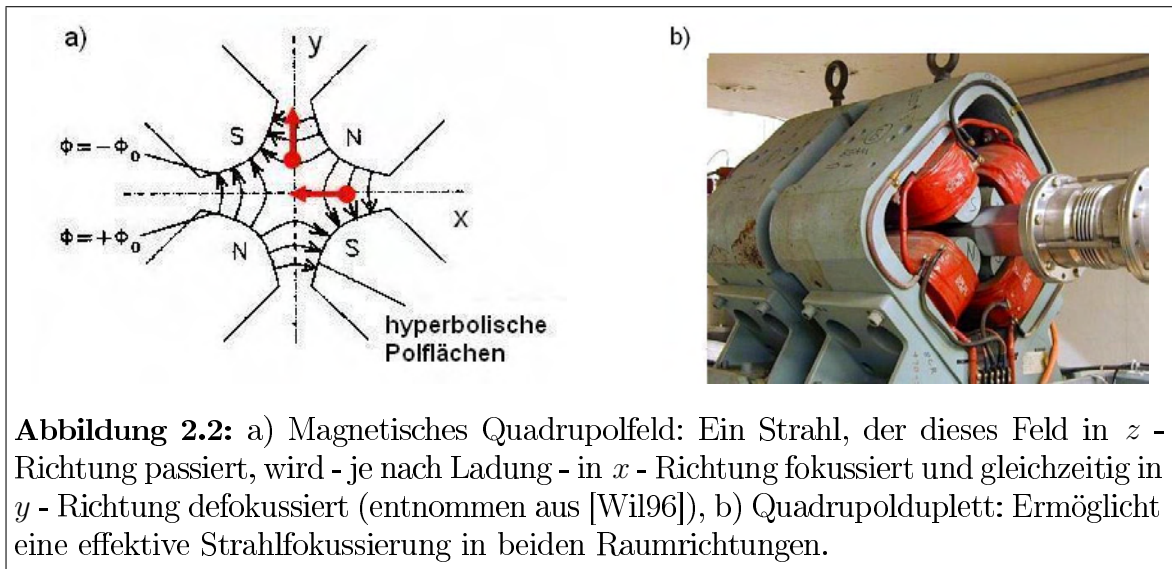
In dieser Tabelle erkennt man, dass das Gravitationskraftfeld zum Einsatz in Teilchenbeschleunigern um Größenordnungen zu schwach ist. Dagegen ist das starke sowie das schwache Kraftfeld aufgrund der geringen Reichweiten technisch nicht nutzbar. Daher kommt nur das elektromagnetische Kraftfeld zum Einsatz in Beschleunigern in Frage. Allerdings trägt auch hier nur das elektrische Feld zur Beschleunigung bei, da das Bahnelement \vec{dr} stets parallel zum Geschwindigkeitsvektor \vec{v} ist. Für die Energieänderung ΔE gilt im elektrischen Feld \vec{E} und im magnetischen Feld \vec{B} :

$$\Delta E = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \cdot \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) \cdot d\vec{r} = q \cdot U \quad , \quad (2.2)$$

wobei U die elektrische Potentialdifferenz zwischen Start - und Zielpunkt und q die Teilchenladung beschreibt.

Strahlführung

Obwohl das Magnetfeld einem geladenen Teilchen keine Energie zuführen kann, spielt es eine wichtige Rolle im Teilchenbeschleuniger, da es zur Strahlführung benutzt wird. Zur Strahlführung gehört sowohl die Strahlfokussierung als auch die Strahlumlenkung und beides könnte prinzipiell auch mit statischen elektrischen Felder realisiert werden: Zur Strahlfokussierung könnte eine Ionenlinse und zur Strahlumlenkung ein homogenes elektrisches Feld eines Kondensators verwendet werden. In Teilchenbeschleunigern werden jedoch in beiden Fällen magnetische Felder verwendet. Dies liegt daran, dass es technisch viel einfacher ist ein Magnetfeld mit einer Stärke von 1 T zu erzeugen, als ein elektrisches Feld von $3 \cdot 10^8 \frac{\text{V}}{\text{m}}$, das nach der Formel $E = c \cdot B$ dieselbe Wirkung hätte [Wil96, Dem04].



Um den Strahl in einem Teilchenbeschleuniger mithilfe eines Magnetfeldes zu fokussieren, benötigt man analog zur geometrischen Optik eine Sammellinse, die auf geladene Teilchen wirkt. Gäbe es magnetische Monopole, so könnte man dazu das Pendant zur elektrostatischen Ionenlinse verwenden. Da jedoch Nord- und Südpol eines Magneten untrennbar sind, ist die Strahlfokussierung auf diese Weise nicht möglich. Deshalb verwendet man sogenannte Quadrupolfelder, in denen das magnetische Feld entlang der Strahlachse verschwindet und mit zunehmendem Abstand von der Achse - im einfachsten Falle linear - stärker wird. Ein solches Feld kann durch die in Abb. 2.2 a) gezeigte Anordnung erzeugt werden.

Passiert ein Strahl dieses Feld in z -Richtung, wird dieser je nach Ladung etwa in x -Richtung fokussiert und gleichzeitig in y -Richtung defokussiert, d.h. mit einem solchen Magneten kann keine effektive Strahlfokussierung in beide Raumrichtungen erreicht werden. Zur effektiven Fokussierung benötigt man vielmehr mindestens zwei räumlich getrennt angeordnete und damit zeitlich nacheinander vom Strahl durchlaufene Quadrupolstrukturen, d.h. ein sogenanntes Quadrupolduplett (vgl. Abb. 2.2). Bei dieser Anordnung wechseln sich Fokussierung und Defokussierung in beiden Raumrichtungen ab und bei geeigneten Brenn- und Driftweiten wirken beide Quadrupolstrukturen gemäß dem Prinzip der „starken Fokussierung“ insgesamt fokussierend. Dieses Prinzip der sogenannten starken Fokussierung wird unter anderem auch bei der Speicherung und Lokalisation von geladenen Teilchen in einer Paulfalle verwendet (vgl. Kap. 2.2.2) und kann an einem optischen Analogon in Abb. 2.3 verdeutlicht werden.

Ein Strahl, der auf die Zerstreuungslinse D trifft, wird zunächst aufgeweitet, was der defokussierenden Kraft im Quadrupolfeld entspricht. Durch diese Aufweitung trifft der

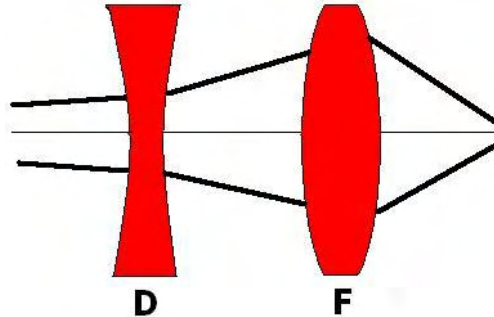


Abbildung 2.3: Prinzip der starken Fokussierung: Ein Strahl, der auf die Zerstreuungslinse D trifft, wird aufgeweitet und trifft die Sammellinse F in einem größeren Abstand zur optischen Achse. Bei gleichen Brennweiten wird dann der Strahl stärker fokussiert als defokussiert.

Strahl die Sammellinse F nun in einem größeren Abstand zur optischen Achse und wird daher stärker fokussiert, als er zuvor aufgeweitet wurde. Wenn nun die Brennweiten der beiden Linsen gleich groß gewählt werden, so überwiegt insgesamt der fokussierende Teil der Sammellinse. Eine genaue mathematische Beschreibung hierzu findet sich etwa in [Wol87].

Zur Strahlablenkung in Teilchenbeschleunigern werden üblicherweise magnetische Dipolfelder verwendet, die auf einer endlichen Länge ein homogenes, senkrecht zur Strahlachse orientiertes Magnetfeld erzeugen.

2.1.3 Gleichspannungsbeschleuniger

Der vom Prinzip her einfachste und intuitivste Teilchenbeschleuniger ist der sogenannte Gleichspannungsbeschleuniger gemäß Cockcroft und Walton. In einem Gleichspannungsbeschleuniger werden geladene Teilchen in einem elektrostatischen Feld zwischen 2 Elektroden, wie in Abb. 2.4 dargestellt, beschleunigt.

Die Energie, die die Teilchen beim Durchlaufen des Feldes gewinnen, ist nach Gl. 2.2 durch $q \cdot U$ gegeben und ist aus technischen Gründen auf einige MeV begrenzt. Oberhalb einer gewissen Spannung zwischen den Elektroden kommt es auch bei optimalen Bedingungen leicht zu Überschlägen, welche die Spannung zusammenbrechen lassen. Weiterhin ist es sehr aufwendig und technisch kaum zu realisieren, Spannungen oberhalb einiger MV zu erzeugen.

Ein Beispiel für einen solchen Gleichspannungsbeschleuniger ist der sogenannte Tan-

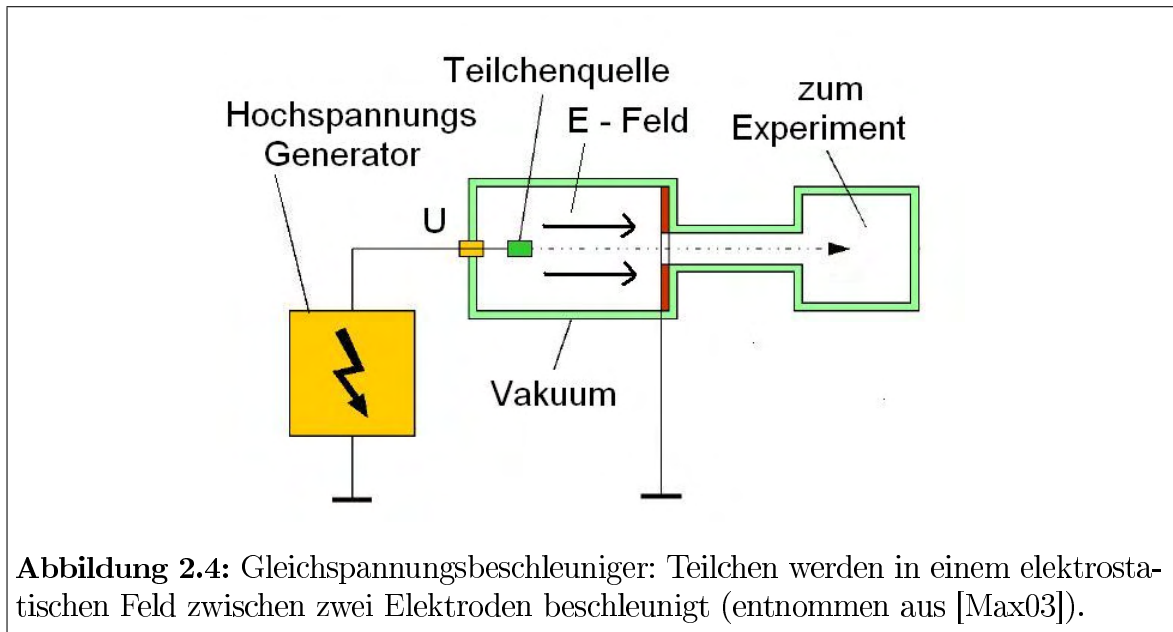


Abbildung 2.4: Gleichspannungsbeschleuniger: Teilchen werden in einem elektrostatischen Feld zwischen zwei Elektroden beschleunigt (entnommen aus [Max03]).

dem - Beschleuniger, der 1936 von Van de Graaff mit seinen Mitarbeitern erstmals gebaut wurde. Die prinzipielle Anordnung dieses Beschleunigers ist in Abb. 2.5 gezeigt. Dieser schiebt die natürliche Grenze der Beschleunigungsenergie, die durch die Maximalspannung zwischen den Elektroden gegeben ist, nach oben, indem die beschleunigende Gleichspannung zweimal genutzt wird.

Zur Beschleunigung von Ionen in einem Tandem - Beschleuniger werden zunächst negative Ionen in einer entsprechenden Ionenquelle erzeugt. Um im Beschleuniger nur Ionen mit einem bestimmten Wert von $\frac{e}{m}$ zu haben, durchlaufen die Ionen zunächst einen Dipolmagneten, der die gewünschten Ionen selektiert. Anschließend werden die negativen Ionen zur positiven Elektrode des Beschleunigers hin beschleunigt und durchlaufen dann ein Strippertarget. Dieser „Stripper“ ist entweder eine Gasstrecke, beispielsweise Stickstoff oder Argon, oder eine dünne Folie. Beim Passieren des Gases oder der Folie werden mehrere Außenelektronen des Ions abgestreift und dadurch die negativen Ionen in positive verwandelt, wobei typischerweise Ladungszustände von $+1$ bis etwa $+10$ erzeugt werden. Die positiven Ionen können dann das gleiche Potential erneut zur Beschleunigung nutzen; dies wird dann um den Faktor des jeweiligen Ladungszustands zusätzlich ausgenutzt.

Die maximal erreichbare Energie der positiven Ionen liegt bei der Beschleunigung in einem Tandembeschleuniger im Bereich von einigen hundert kV bis zu wenigen 10 MV [Wil96, Pol05].

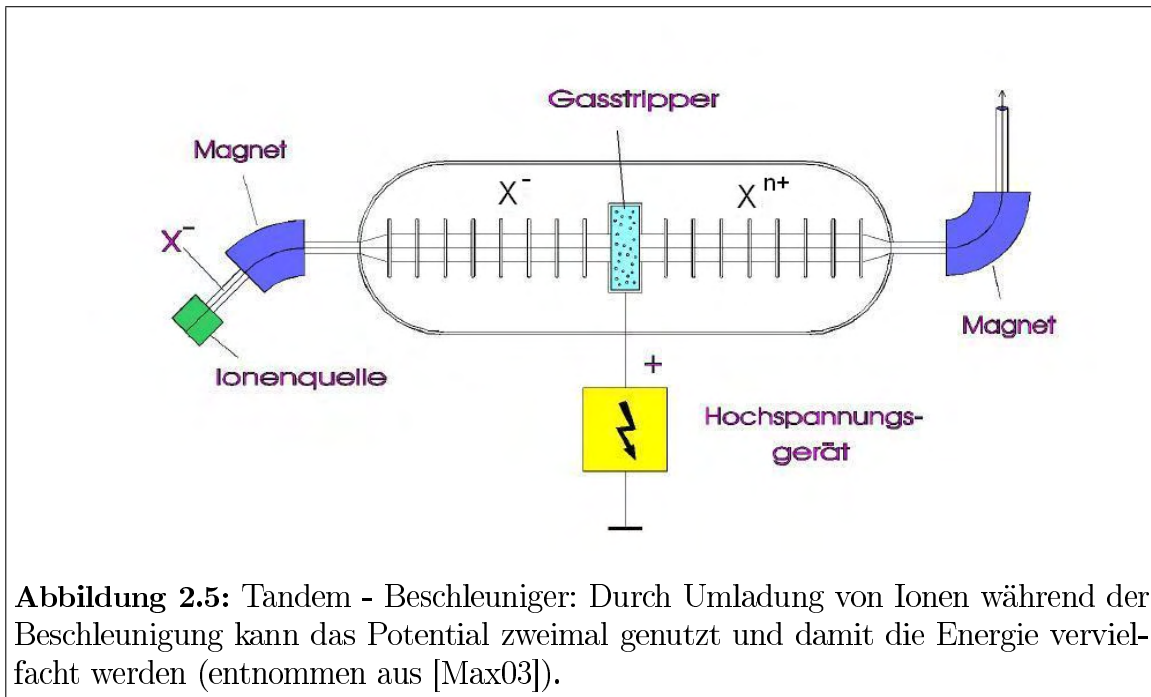


Abbildung 2.5: Tandem - Beschleuniger: Durch Umladung von Ionen während der Beschleunigung kann das Potential zweimal genutzt und damit die Energie vervielfacht werden (entnommen aus [Max03]).

2.1.4 Der Linearbeschleuniger

Ein anderer experimenteller Ansatz, der das Problem der Maximalspannung des Gleichspannungsbeschleunigers umgeht, beruht auf einer schrittweisen Energieerhöhung. Statt einer Gleichspannung wird in diesen Teilchenbeschleunigern eine Wechselspannung eingesetzt. Das Prinzip eines solchen sogenannten Hochfrequenzbeschleunigers wird im Folgenden anhand des linearen Beschleunigers erläutert.

Grundsätzlich können Linearbeschleuniger in zwei Klassen - genauer Wideröe- und Alvarezbeschleuniger - unterteilt werden und an dieser Stelle wird zunächst der Wideröeschleuniger behandelt, da dieser intuitiver und leichter zu verstehen ist.

Wideröe - Linearbeschleuniger

Die prinzipielle Anordnung eines linearen Wideröeschleunigers ist in Abb. 2.6 dargestellt. Er besteht grundsätzlich aus mehreren axial hintereinander gereihten Röhren, welche abwechselnd auf gleicher Spannung liegen. Ein Teilchen, welches die Teilchenquelle verlässt, wird durch das elektrische Feld im ersten Spalt zur ersten Röhre hin beschleunigt. Innerhalb dieser Röhre fliegt es dann, wie in einem Faradayschen Käfig, kräftefrei und somit ohne weitere Beschleunigung weiter. Damit das Teilchen bei Austritt aus der ersten Driftröhre erneut beschleunigt wird, muss die Hochfrequenz - Spannung (im Folgenden abgekürzt mit HF - Spannung) entsprechend ihr Vorzeichen

gewechselt haben. Die Frequenz der HF - Spannung muss somit der Geschwindigkeit der Teilchen angepasst werden. Aus technischen Gründen wird allerdings die HF - Spannung in den meisten HF - Beschleunigern über die gesamte Zeit der Beschleunigung konstant gehalten und es werden stattdessen die Driftröhren in Bewegungsrichtung immer länger ausgebildet.

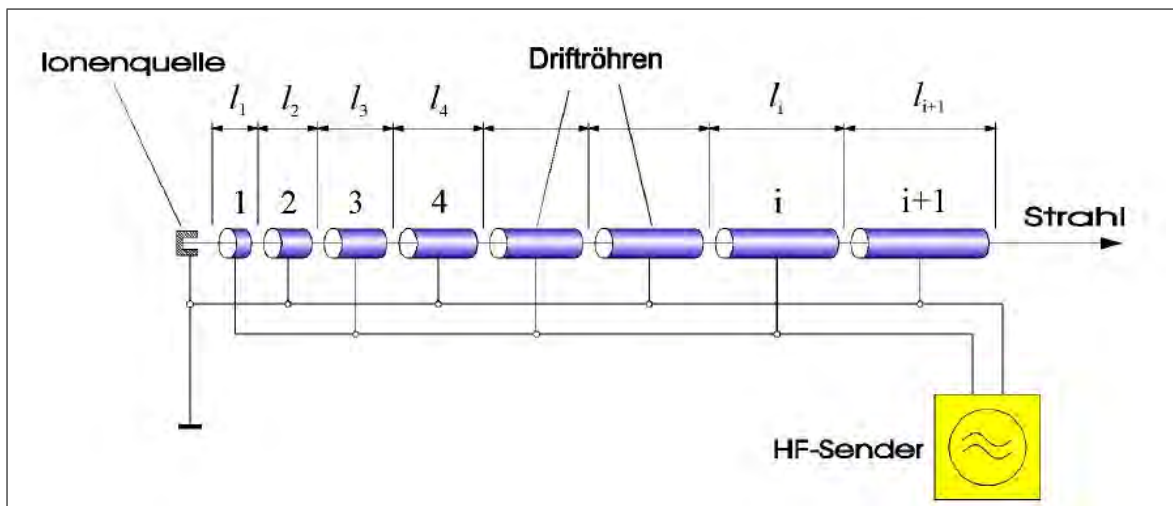


Abbildung 2.6: Wideröe - Linearbeschleuniger: Axial hintereinander gereihete Röhren liegen abwechselnd auf gleicher hochfrequenter Wechselspannung und die Energie des Teilchens wird schrittweise erhöht (entnommen aus [Max03]).

Eine erste experimentelle Demonstration eines sogenannten Wideröe - Beschleunigers gelang R. Wideröe im Jahre 1928. Er beschleunigte damals mit wenigen Driftröhren Kalium - und Natrium - Ionen auf 40 keV [BFB02]. Abbildung 2.7 gibt einen Eindruck über die Dimensionen eines modernen Wideröe - Beschleunigers, wie er in der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) in Darmstadt zur Beschleunigung von schweren Ionen eingesetzt wird.

Länge der Driftröhren eines Wideröe - Linearbeschleunigers

Eine grobe Abschätzung über die benötigte Länge der Driftröhren kann folgendermaßen vorgenommen werden: Man geht davon aus, dass die Driftröhrenlänge so gewählt ist, dass die Teilchen den Beschleunigungsspalt immer nach der halben Periodendauer der HF - Spannung erreichen. Weiterhin soll der Abstand zwischen den Driftröhren stets konstant sein.



Abbildung 2.7: Wideröe - Beschleuniger an der GSI in Darmstadt

Der Abstand zwischen dem n - ten und $(n+1)$ - ten Spalt ist gegeben durch:

$$l_n = \frac{1}{2} \cdot v_n \cdot T = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_n}{\nu} , \quad (2.3)$$

wobei v_n die Geschwindigkeit in der n - ten Driftröhre, T die Periodendauer und ν die Frequenz des Hochfrequenzfeldes bezeichnet.

Bei nichtrelativistischen Geschwindigkeiten kann man die kinetische Energie eines Teilchens der Masse m angeben als:

$$E_n = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_n^2 . \quad (2.4)$$

Diese kinetische Energie haben die Teilchen durch die Beschleunigung im elektrischen Feld gewonnen, so dass gilt:

$$E_n = n \cdot q \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) . \quad (2.5)$$

Aus Gl. 2.4 und Gl. 2.5 erhält man somit für v_n :

$$v_n = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot q \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{m}} . \quad (2.6)$$

Setzt man diesen Zusammenhang für die Teilchengeschwindigkeit in Gl. 2.3 ein, so

ergibt sich für den Abstand zwischen dem n - ten und $(n+1)$ - ten Spalt:

$$l_n = \frac{1}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot q \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{m}} \quad (2.7)$$

Da der Spalt im Vergleich zur Rohrlänge in der Regel klein ist, kann der Abstand zwischen den Spalten mit der Rohrlänge angenähert werden. Mit dieser Annäherung erkennt man in Gl. 2.7, dass die Länge der Driftröhre proportional zu \sqrt{n} ansteigt.

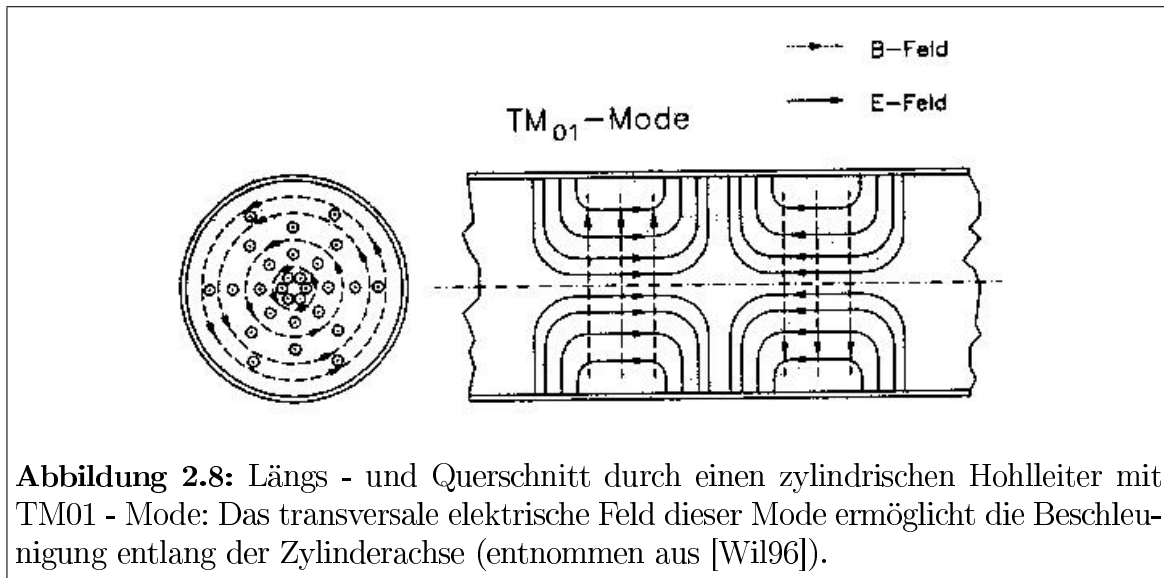
Nun hat man zur Herleitung dieser Formel angenommen, dass die Teilchen nichtrelativistische Geschwindigkeiten besitzen. Für leichte Teilchen, die sehr schnell relativistische Geschwindigkeiten erreichen, müssten die Driftröhren entweder sehr lang sein oder man bräuchte extrem hohe Frequenzen. Um entsprechend hohe Werte sowohl im Raum als auch in der Frequenz zu vermeiden, wird dieser Driftröhrenbeschleuniger hauptsächlich für Protonen und schwere Ionen eingesetzt.

Eine Möglichkeit, den Platz und die Kosten einer Beschleunigungseinrichtung mit hohen Energien einzuschränken, bieten sogenannten Kreisbeschleunigern, zu denen etwa das Zyklotron zählt. Bei einem Zyklotron werden die Teilchen auf einer Kreisbahn beschleunigt und dieselbe Beschleunigerstruktur wird vielfach verwendet, was den Platzbedarf der Einrichtung deutlich reduziert. Da solche Kreisbeschleuniger jedoch für die Durchführung des Schülerprojektes nicht von Relevanz sind, wird in dieser Arbeit nicht näher auf deren Funktionsweise eingegangen. Eine gut verständliche Beschreibung ist in [Wil96] zu finden.

Alvarez - Linearbeschleuniger

In heutigen Linearbeschleunigern werden Frequenzen im Bereich von einigen hundert MHz bis zu etlichen GHz benutzt. In diesem Frequenzbereich wird anstelle der oben beschriebenen Driftröhrenstruktur eine Struktur mit Hohlraum - Resonatoren verwendet, die man Alvarez - Struktur nennt. Hohlraum - Resonatoren in Beschleunigern kann man sich prinzipiell genauso wie Resonatoren für Schallwellen, also zum Beispiel wie eine Orgelpfeife vorstellen. In diesen Resonatoren können je nach Länge nur ganz bestimmte Schwingungen mitsamt den Obertönen angeregt werden. Hin - und rücklaufende Welle ergeben dann eine stehende Welle.

Überträgt man die Überlegungen für akustische Resonatoren auf Hohlraumresonatoren für elektromagnetische Schwingungen, so muss die Amplitude der akustischen Schwingung lediglich durch eine geeignete elektromagnetische Größe - etwa der elektrischen



Feldstärke - ersetzt werden. Mit den Randbedingungen, dass das elektrische Feld parallel und das magnetische Feld senkrecht zur Oberfläche verschwinden muss, kann man die im Zylinder möglichen Feldkonfigurationen bzw. Moden berechnen. Eine Momentaufnahme der in der Beschleunigerphysik bedeutendsten Mode, der TM_{01} - Mode, ist in Abb. 2.8 gezeigt. TM steht hierbei für **T**ransversal **M**agnetisch und die Mode zeichnet sich dadurch aus, dass sie elektrische Felder parallel zur Zylinderachse hat, die die Teilchen beschleunigen können. Eine viertel Periode nach dieser Momentaufnahme in Abb. 2.8 ist das elektrische Feld entlang der Symmetrieachse im ganzen Resonator Null und nach einer weiteren viertel Periode hat das elektrische Feld seine Richtung geändert. Die Bewegung eines Teilchens in einem Alvarez - Beschleuniger kann man sich anschaulich wie die Bewegung eines Surfers auf einer Welle vorstellen, der immer den Schwingungsbauch der Wasserwelle in der passenden Richtung erreichen muss, um beschleunigt zu werden (vgl. Abb. 2.9)

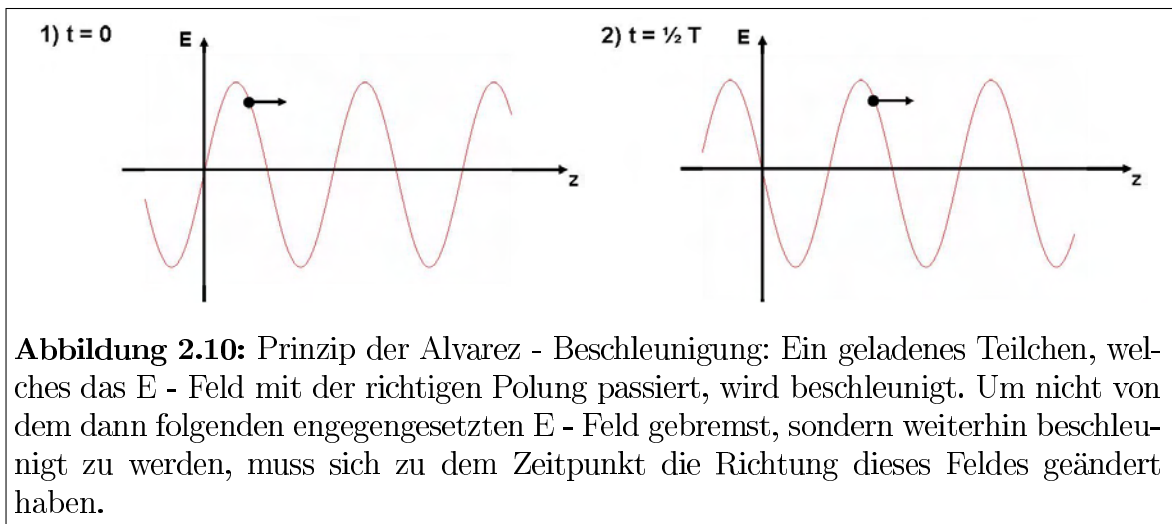
Ein Teilchen, welches den Schwingungsbauch des E - Feldes im Resonator bei maximaler Stärke und richtiger Polung passiert, wird zunächst beschleunigt. Um jedoch nach einer Strecke von $\frac{\lambda}{2}$ nicht durch das entgegengesetzte E - Feld gebremst zu werden, muss dieses an dieser Stelle seine Richtung geändert haben. Das Teilchen muss somit die Strecke $\frac{\lambda}{2}$ bis zum nächsten Schwingungsbauch in der halben Periodendauer durchlaufen, um weiter beschleunigt zu werden (vgl. Abb. 2.10). Dies bedeutet allerdings für die Geschwindigkeit der Teilchen, dass diese

$$v = \frac{\frac{\lambda}{2}}{\frac{T}{2}} = \frac{\lambda}{T} = v_{\text{phaseHohlleiter}}$$

betragen muss. Man kann zeigen, dass diese Phasengeschwindigkeit im Hohlleiter größer



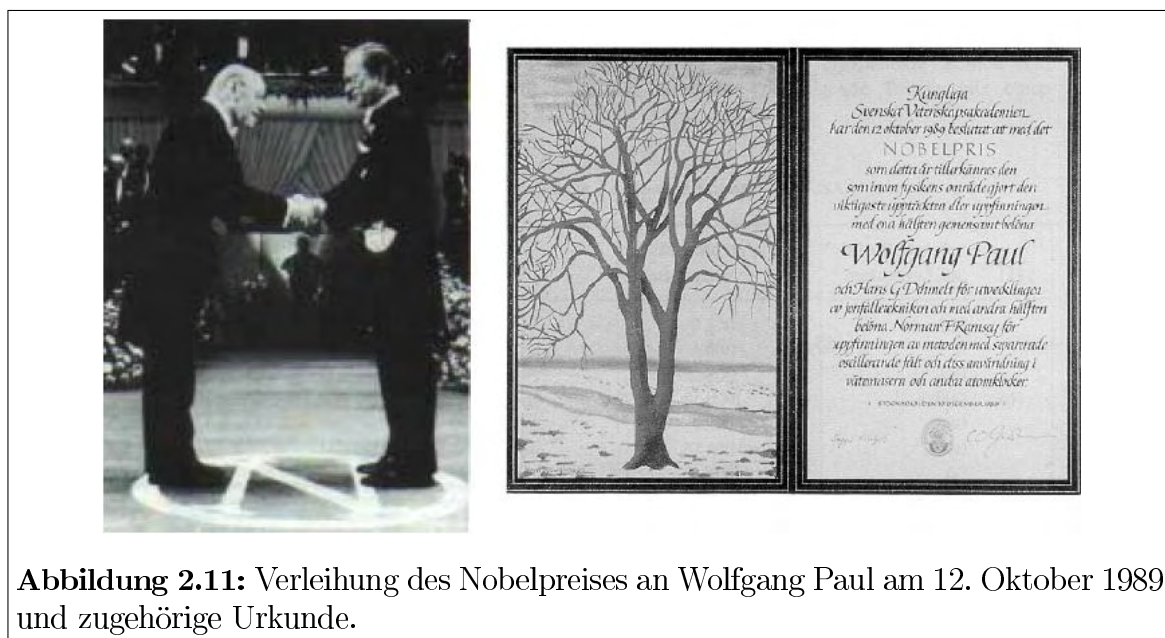
ist als Lichtgeschwindigkeit. Ohne eine Modifikation des Hohlleiters wäre also eine Teilchenbeschleunigung nicht möglich, da die Teilchen nie schneller als Licht sein können. Um den zylindrischen Hohlleiter dennoch zur Teilchenbeschleunigung nutzen zu können, wird dieser durch sogenannte Irisblenden im geeigneten Abstand modifiziert. Je nach Abstand der Blenden kann die Phasengeschwindigkeit im Hohlleiter auf im Prinzip beliebige Werte eingestellt werden. Die Funktionsweise der Irisblenden soll jedoch an dieser Stelle nicht genauer dargestellt werden - es sei dazu auf [Wil96] verwiesen.



2.2 Die Paulfalle

2.2.1 Geschichtlicher Kontext

Eine Einrichtung zur Speicherung und Lokalisation von geladenen Teilchen mittels einer Überlagerung elektromagnetischer Gleich - und Wechselspannungsfelder, die sogenannte Paulfalle, wurde von Wolfgang Paul entwickelt. Ihm verdankt sie auch ihren Namen. Für diese Entwicklung wurde ihm 1989 zusammen mit seinen Kollegen Hans Dehmelt und Norman Ramsay der Nobelpreis verliehen. Abbildung 2.11 zeigt die Übergabe durch Carl XVI. Gustav von Schweden sowie die Urkunde.



Was aber macht dieses Speichern und Lokalisieren von Teilchen, das häufig auch als Einfangen bezeichnet wird, so bedeutsam, dass Wolfgang Paul dafür den Nobelpreis erhielt? Diese Frage wird beantwortet, wenn man die Verwendung von Paulfallen in der Forschung betrachtet: Die Tatsache der kontrollierten Fixierung eines geladenen Teilchens in einem kleinen Raumbereich ermöglicht es, einzelne Teilchen, z.B. Ionen oder Elektronen nahezu ungestört über einen längeren Zeitraum zu untersuchen. Vor der Entwicklung von Paulfallen war es immer nur möglich, Untersuchungen an einem ganzen Ensemble von Teilchen in stark begrenzten Wechselwirkungszeiten durchzuführen. Durch die Wechselwirkung zwischen den Teilchen waren daher die Resultate mit hohen Ungenauigkeiten behaftet. Mithilfe von Paulfallen können nun lang dauernde Präzisionsmessungen an weitgehend wechselwirkungsfreien Ensembles oder sogar Einzelteilchen durchgeführt und somit hochgenaue Erkenntnisse über den Mikrokosmos erlangt werden. Dies ist vor allem in der Atom - und Quantenphysik, aber auch zum

Beispiel in Teilgebieten der Chemie von großem Interesse.

Im Bereich der Atomphysik ist die Anwendung von Paulfallen sehr vielseitig: Paulfallen werden beispielsweise zur hochpräzisen optischen Spektroskopie an Ionen verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiet der Paulfallen ist im Bereich von Atomuhren zu finden. Am Atomstrahl wird momentan eine Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-15}$ realisiert. Diese nur schwer vorstellbare Zahl bedeutet, dass eine Uhr dieser Genauigkeit in 10 Millionen Jahren nur um eine Sekunde von der exakten Zeit abweicht. Diese Präzision ist jedoch mit Messmethoden, die auf Paulfallen basieren, noch zu überbieten. Durch das Speichern und Lokalisieren einzelner Quecksilberionen soll eine Genauigkeit erreicht werden, die eine Uhr in 10 Milliarden Jahren nur um eine zehntel Sekunde falsch gehen lässt. Solch genaue Uhren finden unter anderem Anwendung bei Navigationssystemen von Raumsonden oder etwa dem GPS (Global Positioning System) [Sch00].

Auch im Hinblick auf sogenannte Quantencomputer, an deren Entwicklung derzeit intensiv geforscht wird, sind Paulfallen ein experimenteller Ansatz, der verfolgt wird. Die sogenannten Quantenbits könnten dann durch die gezielte Manipulation einzelner, gespeicherter Ionen mit Laserlicht realisiert werden. Ein solcher Quantencomputer wird mehrere Rechnungen herkömmlicher Computer parallel durchführen und in der Zeit, in der ein gewöhnlicher PC 32 Bit verarbeitet, mehr als 4 Milliarden Bit verarbeiten, wodurch viele Rechenverfahren enorm beschleunigt würden [Sch00].

2.2.2 Grundprinzipien

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie es möglich ist, geladene Teilchen mithilfe von elektrischen Wechselfeldern zu speichern und zu lokalisieren und welche Eigenschaften diese Felder dazu erfüllen müssen.

Da man das Teilchen an einer bestimmten Stelle, z.B. dem Symmetriepunkt oder der Symmetrieachse der Falle fixieren möchte, muss es an jedem anderen Ort außerhalb des Symmetriepunktes (bzw. der Symmetrieachse) eine rücktreibende Kraft erfahren. Ideal ist es, wenn diese Kraft F proportional zum Abstand r des Teilchens vom Symmetriepunkt anwächst, d.h.

$$F \propto r \quad , \quad (2.8)$$

da dann analog zum Hooke'schen Federgesetz eine harmonische Schwingung um den Symmetriepunkt entsteht. Ein Potential, das eine solche Kraft auf ein geladenes Teilchen erzeugt, ist das sogenannte Quadrupolpotential

$$\Phi(x, y, z) = \frac{\Phi_0(t)}{r_0^2} \cdot (\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2) \quad , \quad (2.9)$$

wobei r_0 die Fallengröße und $\Phi_0(t)$ die Potentialtiefe charakterisiert. Weiterhin sind x , y und z die drei Raumrichtungen und die Koeffizienten α , β und γ bestimmen die Geometrie der Falle.

Unter der Annahme, dass sich keine Ladungen in der Falle befinden, muss dieses Potential die Laplacegleichung $\Delta\Phi = 0$ erfüllen. Für die Koeffizienten α , β und γ ergibt sich damit folgende Bedingung:

$$\alpha + \beta + \gamma = 0 \quad . \quad (2.10)$$

Bei der Lösung von Gl. 2.10 identifiziert man allgemein zwei Fällen und unterscheidet somit zwei verschiedenen Fallengeometrien:

1. Die zweidimensionale lineare Falle mit $\gamma = 0$ und $\alpha = -\beta$, die keine Kraftwirkung in der dritten Dimension ausübt.
2. Die dreidimensionale punktsymmetrische Falle mit $\alpha = \beta = -2\gamma$.

Näheres zu den beiden Fallengeometrien wird in den folgenden Kapiteln diskutiert. An dieser Stelle soll zunächst das Grundprinzip einer Paulfalle qualitativ diskutiert werden.

Nimmt man zunächst einmal an, die angelegte Spannung an jeder Elektrode der Falle sei konstant, so herrscht innerhalb der Falle ein statisches, elektrisches Quadrupolfeld und der Potentialverlauf ähnelt einem Sattel (vgl. Abb. 2.12 a)). Die x - und y - Achse in Abb. 2.12 geben den Ort innerhalb der Falle an, während auf der z - Achse das dort herrschende Potential aufgetragen ist. Ein geladenes Teilchen, welches sich in diesem statischen Quadrupolpotential befindet, könnte nicht an einer Stelle fixiert werden, denn es spürt zwar eine fokussierende Kraft in x - Richtung aber auch eine defokussierende Kraft in y - Richtung. Aus diesem Grund muss das Sattelpotential über die angelegte Wechselspannungsfrequenz zu einer passenden Zeit umklappen. Eine halbe Periodendauer später verläuft dann das Potential wie in Abb. 2.12 b) dargestellt.

Fokussierung und Defokussierung in beiden Raumrichtungen wechseln sich somit bei einer angelegten Wechselspannung ab. Dabei resultiert bei geeignet gewählter Wechselspannungsfrequenz gemäß dem Prinzip der starken Fokussierung (vgl. Kap. 2.1.2) eine effektiv fokussierende Kraft in x - und in y - Richtung. Im Unterschied zur starken Fokussierung in einem Teilchenbeschleuniger wird hier also ein zeitlich wechselndes Quadrupolfeld statt räumlich getrennt angeordneten und damit zeitlich nacheinander vom Strahl durchlaufenen Quadrupolstrukturen verwendet.

Die Frequenz des wechselnden Quadrupolfeldes, d.h. der Wechsel zwischen Fokussierung und Defokussierung kann als Abstand der Linsen des optischen Analogons (vgl. Abb. 2.3 identifiziert werden. Weiterhin bestimmt die Höhe der an die Paulfalle angelegten Spannung wie stark das Teilchen fokussiert bzw. defokussiert wird, d.h. diese

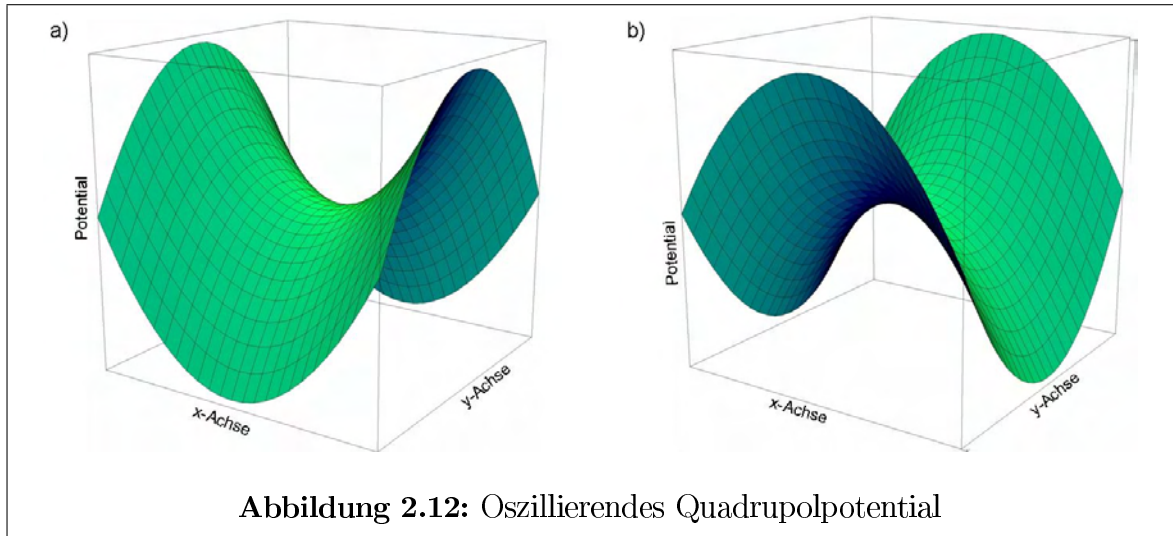


Abbildung 2.12: Oszillierendes Quadrupolpotential

Spannung ist das Analogon zur Brennweite der Linsen.

2.2.3 Die zweidimensionale lineare Falle

Im Folgenden soll auf die zweidimensionale lineare Falle eingegangen werden, die grundsätzlich keine Kraftwirkung in der dritten Dimension ausübt. Für den Spezialfall $\alpha = -\beta$, ist das Potential in der Falle gegeben durch

$$\Phi(x, y, t) = \frac{\Phi_0(t)}{r_0^2} \cdot (x^2 - y^2) \quad .$$

Ein solches Potential kann mit vier parallelen, hyperbolisch geformten Elektroden erreicht werden, an die eine Spannung $\Phi_0(t) = \pm(U + V \cos(\omega t))$ angelegt wird. U ist hierbei eine Gleich- und $V \cos(\omega t)$ eine Wechselspannung. Wie in Abb. 2.13 a) dargestellt, müssen nebeneinander liegende Stäbe auf entgegengesetzter Spannung $+\Phi_0(t)$ und $-\Phi_0(t)$ liegen.

Um der Frage nachzugehen, unter welchen Voraussetzungen, d.h. bei welchen Spannungen oder Frequenzen die Teilchen in der Falle gespeichert werden können oder nicht, werden im Folgenden die Bewegungsgleichungen näher betrachtet:

Für ein Teilchen der Masse m und der Ladung q macht man zunächst folgenden Ansatz:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = e \cdot \vec{E} \quad . \quad (2.11)$$

Damit erhält man die Differentialgleichung

$$m \cdot \ddot{\vec{x}} + e \cdot \nabla \Phi(x, y, t) = 0 \quad , \quad (2.12)$$

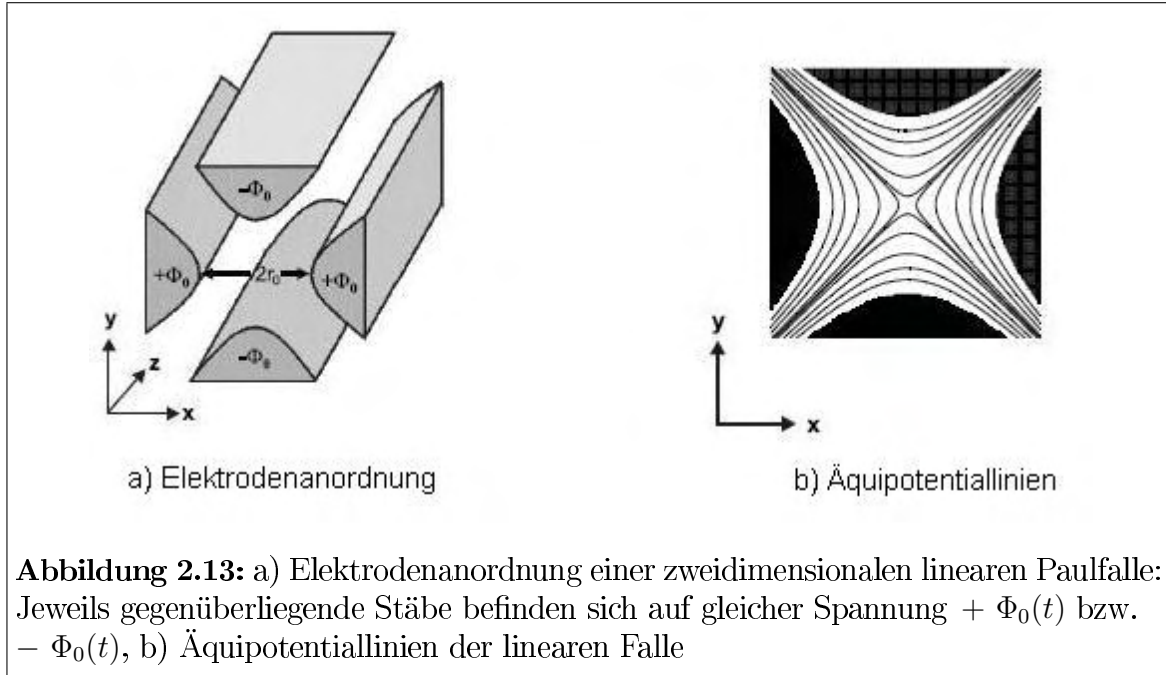


Abbildung 2.13: a) Elektrodenanordnung einer zweidimensionalen linearen Paulfalle: Jeweils gegenüberliegende Stäbe befinden sich auf gleicher Spannung $+\Phi_0(t)$ bzw. $-\Phi_0(t)$, b) Äquipotentiallinien der linearen Falle

und somit die Bewegungsgleichungen in x - y - und in z - Richtung:

$$\ddot{x} + \frac{2e}{mr_0^2}(U + V\cos(\omega t))x = 0 \quad , \quad (2.13)$$

$$\ddot{y} - \frac{2e}{mr_0^2}(U + V\cos(\omega t))y = 0 \quad , \quad (2.14)$$

$$\ddot{z} = 0 \quad . \quad (2.15)$$

x - und y - Richtung unterscheiden sich also nur um ein Vorzeichen und in z - Richtung wirkt keine Kraft auf das Teilchen, so dass es sich in diese Richtung mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegen wird.

Zur Lösung der beiden oberen Bewegungsgleichungen werden folgende Substitutionen in den Bewegungsgleichungen durchgeführt:

$$\frac{4eU}{mr_0^2\omega^2} = a; \quad \frac{2eV}{mr_0^2\omega^2} = q; \quad \omega t = 2\zeta \quad . \quad (2.16)$$

Man erhält damit die in der Mathematik detailliert untersuchten Mathieu'schen - Differentialgleichungen, die in ihrer Normalform lauten:

$$\frac{d^2u}{d\zeta^2} + (a - 2q\cos(2\zeta))u = 0 \quad (2.17)$$

[Pau90, Gho95].

Die Lösung der Mathieu'schen Differentialgleichung wird in zahlreichen mathematischen Standardwerken abgeleitet; sie lautet:

$$u = A \cdot e^{\mu\zeta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\zeta} + B \cdot e^{-\mu\zeta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\zeta} . \quad (2.18)$$

Während die Koeffizienten A und B aus den Anfangsbedingungen bestimmt werden, hängen c und μ nur von den oben eingeführten sogenannten Stabilitätsparametern a und q ab. Die Lösung der Mathieu'schen Differentialgleichung verdeutlicht, dass es zwei Arten von Bahnkurven gibt, je nachdem, ob der charakteristische Exponent μ rein imaginär, komplex oder reell ist. Ist μ rein imaginär, so liegt eine stabile Lösung vor, d.h. die Teilchen in der Falle bewegen sich mit begrenzter Amplitude in x - und in y - Richtung und passieren die Falle entlang der z - Richtung, ohne gegen die Elektroden zu stoßen. Ist μ allerdings reell oder komplex mit nicht verschwindendem Realteil, so wachsen die Amplituden entweder in x - oder in y - Richtung exponentiell an - in diesem Fall liegt eine instabile Bahn vor. In der Realität können auch Teilchen auf mathematisch stabilen Bahnen verloren gehen, wenn ihre begrenzte Bewegungsamplitude größer als der freie Feldradius wird.

Simuliert man die Bewegung eines Teilchens auf einer stabilen Bahn etwa in x - Richtung mit dem Computer, so erhält man beispielsweise den in Abb. 2.14 gezeigten Graph.

Man erkennt, dass sich die Bewegung grundsätzlich aus zwei unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt. Einer langsamen Oszillation mit großer Amplitude ist eine schnelle Oszillation mit kleiner Amplitude überlagert. Die schnelle Oszillation des Teilchens geschieht entlang der Feldlinien (vgl. Abb. 2.13 b)) mit der Frequenz des angelegten Wechselfeldes und wird Mikrobewegung genannt. Der Grund für die langsame Oszillation ist die Bewegung im sogenannten Effektivpotential bzw. Pseudopotential der Falle. Dieses erhält man aus der Betrachtung der im zeitlichen Mittel auf ein Teilchen wirkenden Kraft. Für den Fall der zweidimensionalen linearen Paulfalle hat das Pseudopotential die Form eines zweidimensionalen harmonischen Oszillators und lautet:

$$\Phi_{eff} = \frac{1}{4} \cdot \frac{e^2 V^2}{m r_0^4 \omega^2} \cdot (x^2 + y^2) . \quad (2.19)$$

Eine genauere mathematische Beschreibung mit Herleitung des Effektivpotentials und der beiden Oszillationen findet man etwa in [MGW05, Geh92, DF03, WO91].

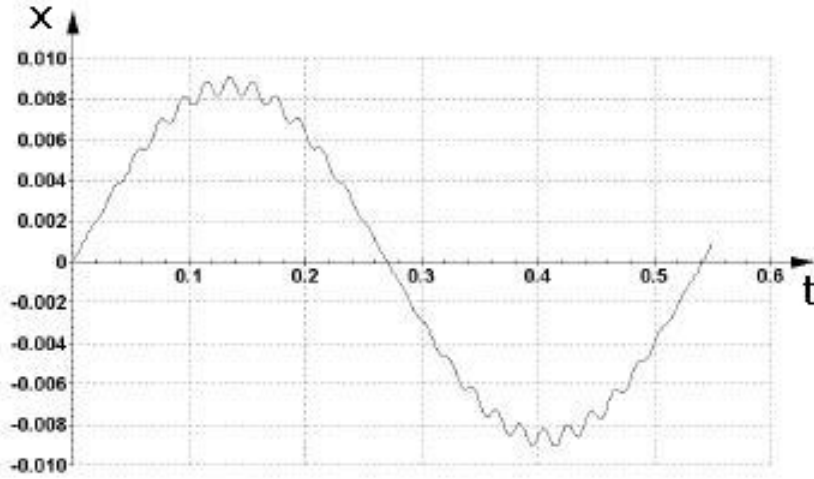


Abbildung 2.14: Simulation der Teilchenbewegung in eine Richtung: Einer langsamen Oszillation mit großer Amplitude (Makrobewegung) ist eine schnelle Oszillation mit kleiner Amplitude (Mikrobewegung) überlagert (entnommen aus [DF03]).

Die zweidimensionale lineare Paulfalle als Massenfilter

Wie schon erwähnt, können Teilchen mit einem gewissen $\frac{e}{m}$ - Verhältnis nur bei geeigneten Stabilitätsparametern in einer Paulfalle gespeichert werden. Das in Abb. 2.15 dargestellte Stabilitätsdiagramm der Mathieu'schen - Differentialgleichung gibt nun an, bei welchen a - q - Kombinationen ein Teilchen eine stabile oder instabile Bahn im zweidimensionalen Quadrupolfeld durchläuft.

Der erste Bereich, in dem sowohl die x - als auch die y - Richtung stabil sind, ist hierbei in Abb. 2.15 zusätzlich vergrößert dargestellt. Bei vorgegebenen Feldparametern r_0 , ω , U und V haben alle Ionen mit dem gleichen $\frac{e}{m}$ - Verhältnis den gleichen Punkt (a , q) im Stabilitätsdiagramm. Für fest eingestellte Feldwerte bewegen sich also Ionen mit günstigem $\frac{e}{m}$ - Verhältnis auf einer stabilen Bahn entlang der Fallachse und andere werden aufgrund ihres „falschen“ $\frac{e}{m}$ - Verhältnisses aus der Falle aussortiert. Diese Tatsache ermöglicht es, eine zweidimensionale lineare Paulfalle auch als Massenfilter zu betreiben. Hierzu werden die Gleichspannung U und die Wechselspannung V bei fester Frequenz ω derart variiert, dass man sich im Stabilitätsdiagramm auf einer sogenannten Arbeitsgeraden (vgl. Abb. 2.15) mit der Steigung $\frac{a}{q} = \frac{2U}{V}$ befindet. Bei einer Steigung knapp unter 0,166 schneidet die Arbeitsgerade den stabilen Bereich nahe der Spitze im Intervall Δq , so dass nur ein sehr kleiner Massenbereich Δm die Falle auf einer stabilen Bahn passieren kann [PR55]. Die Massenauflösung des Massenfilters ist folglich mit diesen Einstellungen am besten. Je flacher man die Steigung der Arbeitsgeraden wählt, desto größer wird Δq und desto schlechter die Massenauflösung. Eine

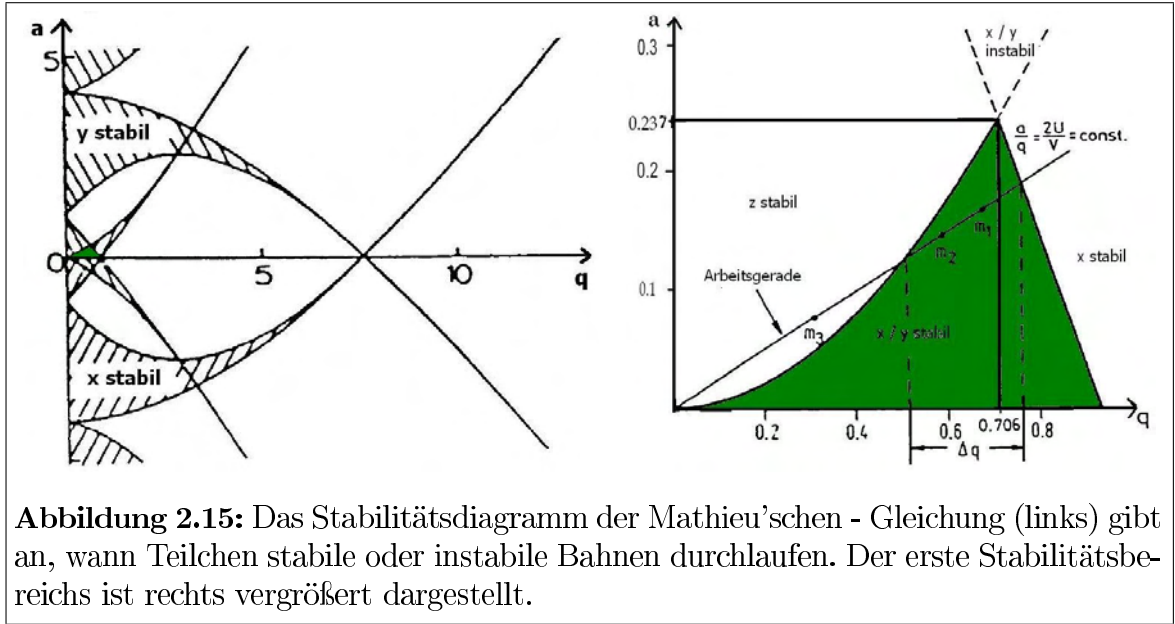


Abbildung 2.15: Das Stabilitätsdiagramm der Mathieu'schen - Gleichung (links) gibt an, wann Teilchen stabile oder instabile Bahnen durchlaufen. Der erste Stabilitätsbereich ist rechts vergrößert dargestellt.

genaue Diskussion zur Verwendung der zweidimensionalen linearen Paulfalle als Quadrupolmassenfilter findet sich in [PR55, PRvZ58, Bla00].

Die zweidimensionale Paulfalle im dreidimensionalen Raum

Um in einer zweidimensionalen linearen Paulfalle auch eine Speicherung in der dritten Dimension zu erreichen, ist es notwendig die vier parallelen Elektroden an beiden Enden mit Kappenelektroden zu versehen und diese auf $+\Phi_0(t)$ bzw. $-\Phi_0(t)$ zu legen. Im Folgenden wird diese zweidimensionale lineare Paulfalle, die auch in der dritten Dimension eine Kraftwirkung hat, abkürzend mit linearer Paulfalle bezeichnet. Um den Aufbau der linearen Falle beispielsweise für Schülerexperimente so einfach wie möglich zu gestalten, wird an die Stäbe eine reine Wechselspannung ohne Gleichspannungsanteil angelegt ($a = 0$). Die Arbeitsgerade hat in diesem Fall die Steigung null und Δq ist maximal. Man erhält hier Stabilität für $q < 0,92$, d.h. alle Ionen mit

$$\frac{e}{m} < \frac{0,92}{2} \cdot \frac{r_0^2}{V} \cdot \omega^2 \quad (2.20)$$

können in der Falle gespeichert werden. Um folglich ein Teilchen mit einem größeren $\frac{e}{m}$ - Verhältnis und somit entsprechender kleinerer Masse zu speichern, muss entweder eine größere Wechselspannungsfrequenz angelegt oder die angelegte Spannung reduziert werden.

2.2.4 Die dreidimensionale punktsymmetrische Falle

Eine weitere experimentelle Realisierung des Quadrupolfeldes ist die punktsymmetrische Falle. Für die Koeffizienten des Quadrupolpotentials aus Gl. 2.9 betrachtet man hier den Spezialfall $\alpha = \beta = -2\gamma$. Das dazugehörige Potential hat somit die Form

$$\Phi(x, y, z) = \frac{\Phi_0}{2r_0^2} \cdot (x^2 + y^2 - 2z^2) \quad .$$

Ein solches Potential kann durch zwei hyperbolisch geformte Kappenelektroden und eine Ringelektrode erzeugt werden (vgl. Abb. A.2). Hierbei liegen die beiden Kappenelektroden stets auf gleichem Potential $+\Phi_0(t)$ und die Ringelektrode liegt auf $-\Phi_0(t)$.

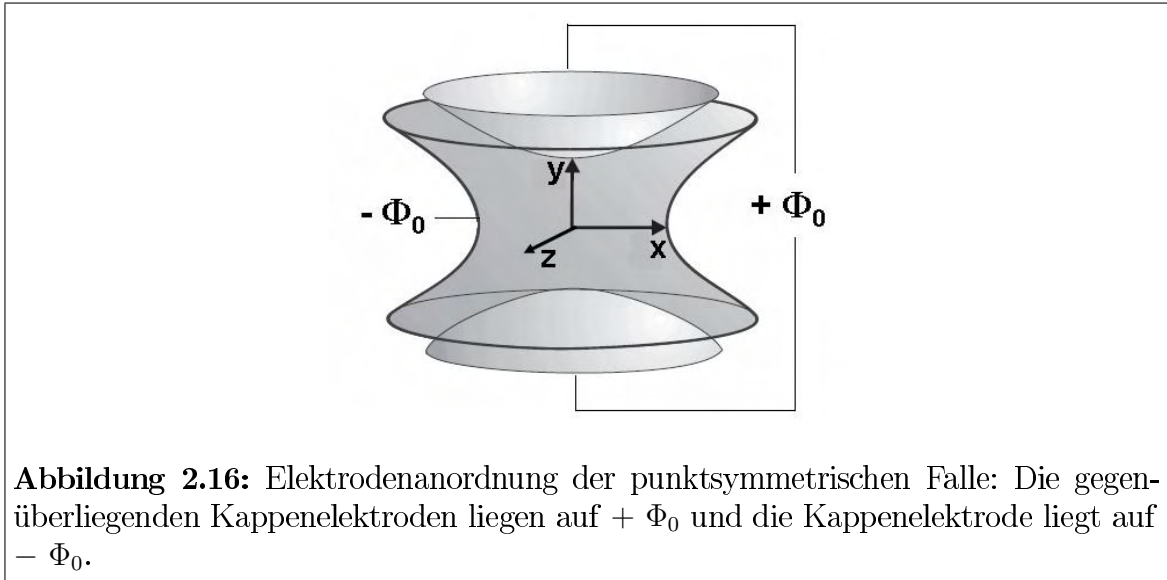


Abbildung 2.16: Elektrodenanordnung der punktsymmetrischen Falle: Die gegenüberliegenden Kappenelektroden liegen auf $+\Phi_0$ und die Kappenelektrode liegt auf $-\Phi_0$.

Analog zur zweidimensionalen linearen Falle kann man die Bewegungsgleichungen der geladenen Teilchen in diesem Quadrupolpotential wieder auf die Mathieu'schen Differentialgleichungen zurückführen [Gho95]. Aus den Bewegungsgleichungen kann man schließlich ableiten, dass die Teilchen in allen drei Raumrichtungen an den Symmetriepunkt gebunden sind. Darin besteht auch der grundlegende Unterschied zur zweidimensionalen linearen Falle. Während die Teilchen in der linearen Falle ohne Kappenelektroden nur in zwei Raumrichtungen fokussiert werden, sind sie in der punktsymmetrischen Falle auch in der dritten Dimension an den Symmetriepunkt gebunden.

Da sich die vorliegende Arbeit primär mit der zweidimensionalen Quadrupolstruktur befasst und außerdem die dreidimensionale Repräsentation mit einigem Rechenaufwand völlig analog beschrieben werden kann, wurde an dieser Stelle auf eine weitere

Behandlung verzichtet. Es wird dazu auf die umfangreich zur Verfügung stehende Literatur [Pau90, Gho95] verwiesen.

2.2.5 Das PALLAS-Experiment

Ein Experiment, bei dem die zweidimensionale Quadrupolstruktur als Speicherring für Ionen eingesetzt wird, ist das sogenannte PALLAS-Experiment (PAuL Laser cooling Acceleration System). Bei diesem Aufbau handelt es sich um eine Struktur aus

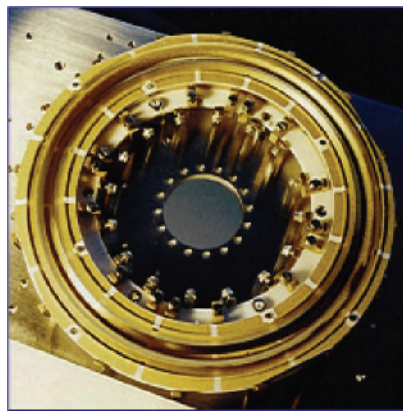


Abbildung 2.17: Aufsicht auf das PALLAS - Experiment: 16 zweidimensionale lineare Fallensegmente sind zu einem Speicherring mit 36,6 cm Umfang gebogen.

16 gebogenen linearen Quadrupolsegmenten, die zu einem Ring mit 36,6 cm Umfang angeordnet sind (vgl. Abb. 2.17). Die einzelnen Segmente sind zweidimensionale lineare Paulfallen und in diesen werden Magnesiumionen entlang der Ringachse gespeichert und dabei durch den Strahlungsdruck eines Lasers auf Energien von etwa 1 eV beschleunigt [Gri01]. Sowohl die Fokussierung als auch die Führung des Strahls übernimmt in diesem Aufbau das Quadrupolpotential.

In den durchgeführten Experimenten mit diesem Aufbau konnte zum ersten Mal ein kristalliner Magnesiumstrahl beobachtet werden, der mit 2700 m/s den Ring umkreiste.

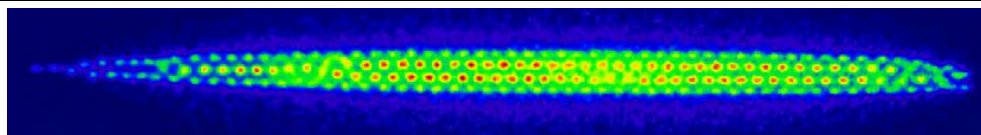


Abbildung 2.18: Kristalline Struktur im Speicherring

Die in der Falle befindlichen, bewegten Magnesiumionen ordnen sich dazu wie Perlen auf einer Kette an. Sichtbar machen kann man eine solche Struktur, die in Abb. 2.18

gezeigt wird, über eine CCD - Kamera, die die Fluoreszenz der angeregten Ionen aufnimmt. Die Stabilisierung der Ionen in Kristallstrukturen ermöglicht so eine sehr viel einfachere Untersuchung von großen Teilchenensembles. Trotz der kleinen Dimension des Aufbaus und der niedrigen Strahlenergien ist es mit diesem Miniatur - Beschleunigerlabor möglich, „schnelle“ Ionenstrahlen und deren Stabilitätskriterien und Kristallisationsverhalten im Detail zu untersuchen und dabei auch Erkenntnisse für große Beschleunigeranlagen zu gewinnen. Weiterführende Literatur zu den Ergebnissen dieser Untersuchungen findet sich etwa in [Gri01, SSH01b, Sch03, SSH01a].

2.3 Quadrupolbeschleuniger

Ein Quadrupolbeschleuniger ist eine lineare Falle, mit der ein Teilchenstrahl sowohl fokussiert als auch beschleunigt werden kann. In diesem Kapitel wird vorgestellt, wie ein solcher Beschleuniger in der Forschung realisiert ist und wo und zu welchem Zweck solche Quadrupolbeschleuniger schon im Einsatz sind.

2.3.1 Geschichtlicher Hintergrund

In Kapitel 2.1.4 wurde der Wideröe - Beschleuniger beschrieben. Um in diesem Protonen oder andere schwere Ionen zu beschleunigen, ist stets eine sogenannte Vorbeschleunigung notwendig, die die Teilchen schon auf eine Energie von etwa 0,5 MeV bringt. Ohne diese Anfangsenergie der Teilchen wäre es nicht möglich, geeignete Abmessungen der Driftröhren im Linearbeschleuniger zu erhalten. Oft wird zu dieser Vorbeschleunigung zunächst ein elektrostatischer Gleichspannungsbeschleuniger benutzt, wie er in Kap. 2.1.3 näher beschrieben wurde. Da in diesem aber die Maximalenergie begrenzt ist, findet man gerade bei schweren Ionen als erste Beschleunigerstufe sogenannte Hochfrequenz - Quadrupolbeschleuniger (HFQ - Beschleuniger). In diesen werden die Teilchen auf solche Energien gebracht, dass sie danach im Wideröe oder Alvarez Linearbeschleunigern effizient weiterbeschleunigt werden können.

Erste Vorschläge für einen solchen Beschleuniger gab es im Jahre 1970 von I.M. Kapchinskii und V.A. Teplyakov, die schon 1974 erfolgreich in die Tat umgesetzt wurden [BFB02].

2.3.2 Funktionsweise

Im HFQ - Beschleuniger werden die vier Elektroden der linearen Falle geeignet in ein Vakuum eingefügt. Dabei erzeugen die vier Elektroden, wie in Kap. 2.2.2 beschrieben, ein HF - Quadrupolfeld, welches gerade niederenergetische Teilchen in transversale Richtung besonders gut auf die Symmetrieachse fokussiert. Der Vorteil dieser Fokussierung durch elektrische Kräfte gegenüber der magnetischen Fokussierung liegt darin, dass die Teilchen unabhängig von der Teilchengeschwindigkeit gleich stark fokussiert werden. Weiterhin haben HFQ - Beschleuniger durch die starke transversale Fokussierung vor allem den Vorteil von starken Strahlströmen.

Um auch eine longitudinale Feldkomponente zur Teilchenbeschleunigung zu erhalten, wird die Elektrodenfläche in Richtung des Teilchenstrahls moduliert. Diese Modulation wird in der Art vorgenommen, dass sich der Radius der Elektrode entlang der Beschleunigungsachse sinusförmig ändert (vgl. Abb. 2.19). Auf diese Weise erhält man durch Anlegen einer Wechselspannung an die linearen Fallensegmente analog zum Alvarez-

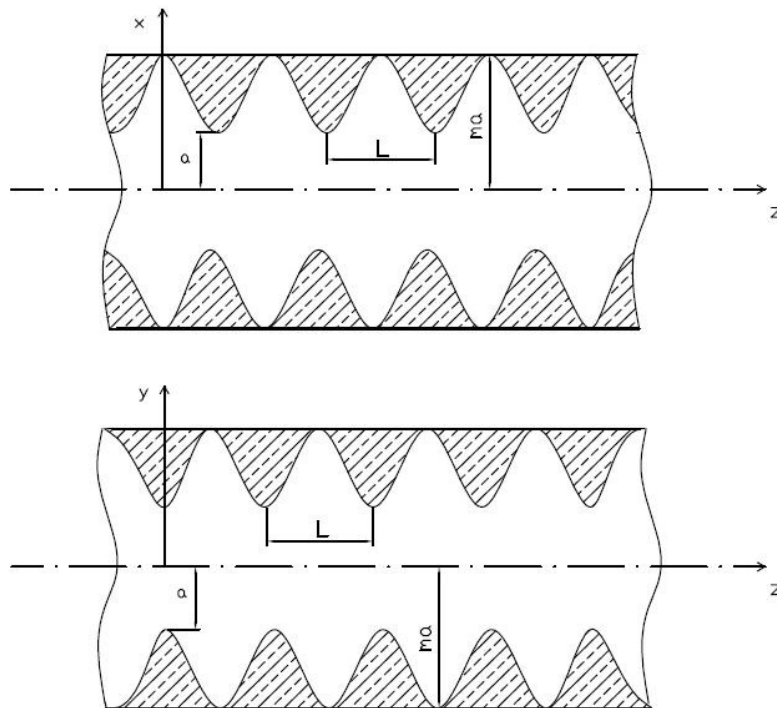


Abbildung 2.19: Schema des HFQ - Resonators: Die Oberfläche der Elektroden der linearen Falle werden moduliert, so dass ein elektrisches Feld entlang der Symmetrieachse entsteht (entnommen aus [Gue06]).

beschleuniger ein stehendes, elektrisches Feld entlang des Teilchenstrahls, das zur Beschleunigung verwendet werden kann. Zusätzlich muss hierbei eine Anpassung an die zunehmende Teilchengeschwindigkeit berücksichtigt werden. Genauer findet sich dazu in [SWC81] und [Gue06] .

3 Experimenteller Aufbau der Teilchenbeschleunigermodelle

In diesem Kapitel ist zunächst die schrittweise Entwicklung der insgesamt drei Teilchenbeschleunigermodelle relativ ausführlich dokumentiert. Alle Modelle werden hier detailliert beschrieben und deren Eignung als Teilchenbeschleunigermodell diskutiert.

3.1 Erstes Modell - Punktsymmetrische Paulfallenreihe

Eine erste Entwicklung eines Teilchenbeschleuniger - Modells über Aneinanderreihung von mehreren Paulfallen wurde schon im November 2005 versucht. Der erste Ansatz wurde mit mehreren punktsymmetrischen Fallenstrukturen realisiert und ist in Abb. 3.1 zu sehen. Als Elektroden dienten 2 mm hohe Kupferringe mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Wandstärke von 1 mm. Diese Kupferringe wurden aus einem Kupferrohr mit passenden Maßen hergestellt und zur Befestigung jeweils an eine Kupferstange mit einer Länge von 55 mm und einem Durchmesser von 2 mm gelötet. Die Kupferstangen haben am unteren Ende ein 20 mm langes Gewinde, wodurch sie mit entsprechenden Muttern in einem Abstand von 10 mm auf einer Plexiglasplatte befestigt werden konnten (vgl. Abb. 3.2).

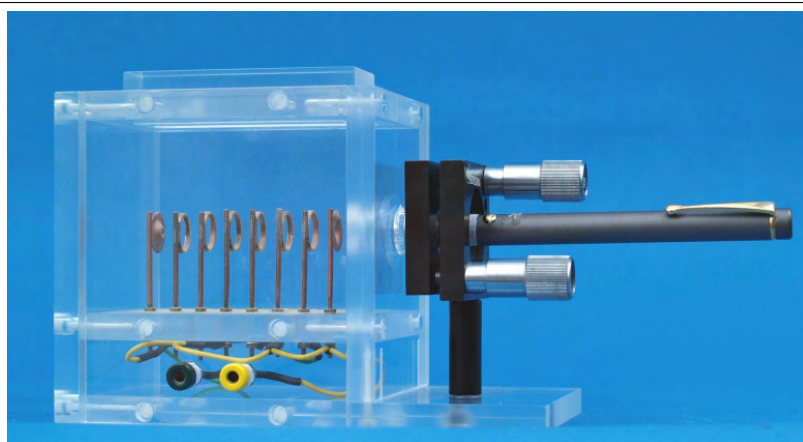


Abbildung 3.1: Aufbau des ersten Modells: Mehrere punktsymmetrische Falle wurden hintereinander gereiht.

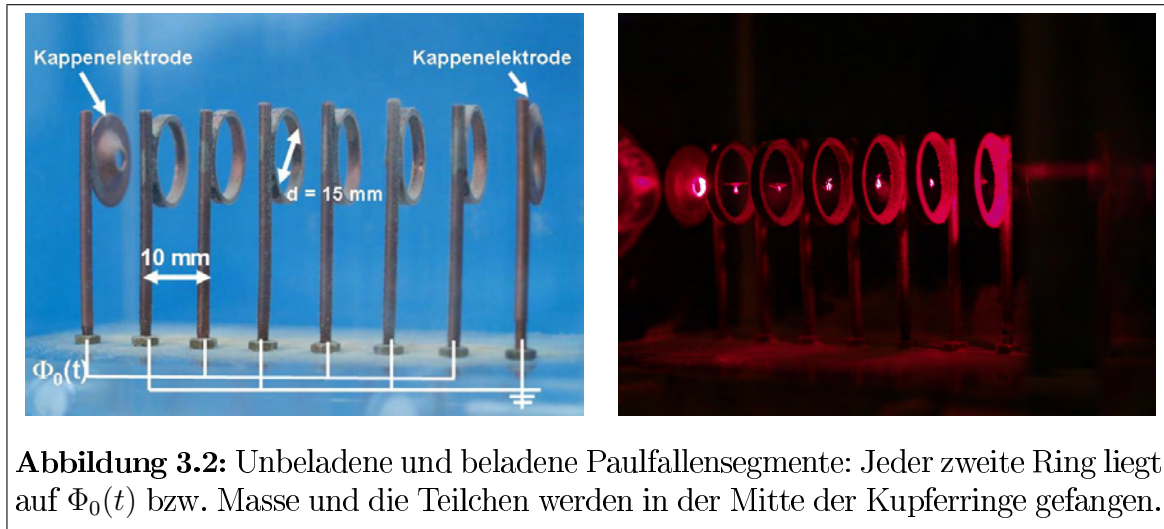


Abbildung 3.2: Unbeladene und beladene Paulfallensegmente: Jeder zweite Ring liegt auf $\Phi_0(t)$ bzw. Masse und die Teilchen werden in der Mitte der Kupferringe gefangen.

Wie schon im einführenden Theoriekapitel 2.2.4 erläutert, müssen die beiden Kappenelektroden der punktsymmetrischen Falle auf einer Polarität der Wechselspannung und die Ringelektrode auf der anderen liegen. Für die hintereinander gereihten, punktsymmetrischen Fallen bedeutet dies, dass jeder zweite Ring auf $+\Phi_0(t)$ bzw. $-\Phi_0(t)$ liegen muss, um näherungsweise das notwendige Quadrupolpotential in dem jeweiligen Fallemittelpunkt zu erzeugen. Um aber auch das Speichern der Teilchen in den beiden äußersten Ringen zu erreichen, wurden, wie in Abb. 3.2 gezeigt, zusätzliche Kappenelektroden aus Kupfer hinzugefügt. Diese Kappenelektroden sind der in der Theorie beschriebenen, hyperbolischen Form angenähert. Sie sind mittig mit einem Loch versehen, so dass ein Laserstrahl entlang der horizontalen Achse, in welcher die Teilchen gespeichert werden, eingeschossen werden kann. Damit können die gespeicherten Teilchen durch das Streulicht gut sichtbar gemacht werden.

Im entwickelten Modell liegt jeder zweite Ring auf einer 50 Hz Wechselspannung von etwa $\Phi_0(t) = 3,5 \text{ kV}$ bzw. auf Masse (vgl. Abb. 3.2). Diese Feldparameter stellten sich bei vorangehenden Aufbauten als besonders geeignet dar, um makroskopische Teilchen zu speichern - die genauen Werte sind jedoch recht unkritisch. Die verwendeten Makroteilchen sind hier sowie in allen noch folgenden Aufbauten Bärlappsporen, d.h. Sporen der Pflanze *Lycopodium Bisdepuratum*, die in jeder Apotheke gekauft werden können. Aber auch gewöhnliches Kakaopulver, Paprikapulver, Backpulver oder Mehl können mit den oben genannten Feldparametern gespeichert werden. Da bei dieser Beschaltung der Wechselspannung keine Gleichspannung überlagert wird, ist der vorne diskutierte Stabilitätsparameter der Mathieu'schen Differentialgleichungen a Null, d.h. mit diesem Aufbau können Teilchen mit $\frac{e}{m} < \frac{0,92}{2} \cdot \frac{r_0^2}{V} \cdot \omega^2 = \frac{0,92}{2} \cdot \frac{(7,5 \text{ mm})^2}{3,5 \text{ kV}} \cdot (2\pi \cdot 50 \text{ Hz})^2 = 7,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ (vgl. Gl. 2.20) gespeichert werden. Dies wird für alle genannten Materialien gut erreicht. Die genannten „Substanzen“ sind zunächst ungeladen und können

in diesem Aufbau daher nicht gefangen werden. Ihre Ladung erhalten die Teilchen erst beim Befüllen der Falle. Dies geschieht üblicherweise durch einen Pinsel, der zunächst in die Bärlappsporen getaucht wird und diese danach an den Elektroden abstreift. Das Abstreifen sorgt dafür, dass die Teilchen geladen werden - bei Bärlappsporen vorzugsweise positiv.

Bei dem hier verwendeten Netzgerät handelt es sich um eine spezielle Anfertigung mit folgenden Merkmalen: Die Spannung des Netzgerätes ist variabel zwischen 0 und 4 kV und die Frequenz zwischen 30 und 200 Hz einstellbar. Wie schon erwähnt, hat sich zum Speichern von Makroteilchen eine Spannung von circa 3,5 kV und eine Frequenz von etwa 50 Hz als besonders geeignet herausgestellt. Alternativ kann auch direkt die Spannung im Bereich von 100 bis 250 V und mit fester Frequenz von 50 Hz, z.B. aus der Steckdose, verwendet werden [Sch02]. Es ist dann lediglich ein Regeltransformator mit entsprechendem Windungsverhältnis notwendig, um die Spannung in den Kilovoltbereich zu transformieren.

Bei der Weiterentwicklung dieses Aufbaus zu einem Teilchenbeschleuniger - Modell traten allerdings Probleme auf. Die dem Aufbau zugeführten Teilchen wurden, wie theoretisch erwartet, jeweils in der Mitte eines jeden Kupferrings gespeichert und waren somit in allen drei Raumrichtungen über das Pseudopotential an den jeweiligen Symmetriepunkt gebunden. Es konnte auch bei Beschaltung der Elektroden mit zusätzlicher Gleichspannung kein Zustand erstellt werden, der den Transport der Teilchen zwischen den Fallensegmenten ermöglicht. Damit konnte also die Funktionsweise eines Teilchenbeschleunigers nicht demonstriert werden. Um dieses Modell also an ein wirkliches Teilchenbeschleunigermodell anzupassen, wurde der experimentelle Ansatz geändert und ein zweites Modell auf der Basis einer linearen Paulfalle entwickelt.

3.2 Zweites Modell - Segmentierte lineare Paulfalle

Bei dieser zweiten Variante wurden mehrere lineare Fallen als Segmente hintereinander gebaut, wobei kein achsiales Pseudopotential auftreten sollte. Auch hier wurden die hyperbolisch geformten Elektroden durch runde Stäbe angenähert. Die Elektroden wurden in Form von 3 cm langen, runden Messingstäben mit einem Durchmesser von 4 mm realisiert. Um jeweils vier Stäbe in einem Fallensegment parallel zu fixieren, war es notwendig die Elektroden an einem Plexiglasring zu befestigen, wobei ein freier Feldradius von 8 mm realisiert wurde (vgl. Abb. 3.3).

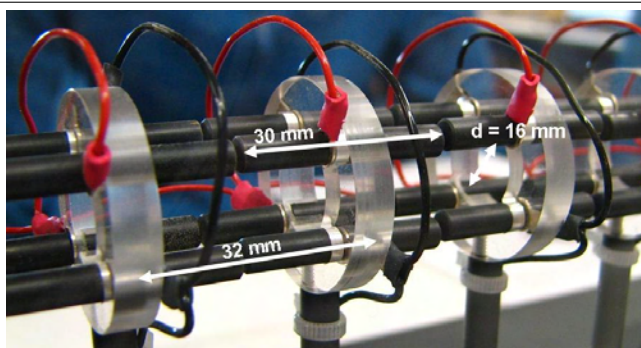


Abbildung 3.3: Fallensegmente des zweiten Modells: Jeweils gegenüberliegende Stäbe liegen auf $\Phi_0(t)$ (rote Kabel) bzw. auf Masse (schwarze Kabel) und die Teilchen werden entlang der horizontalen Achse gefangen.

Dieser Plexiglasring wurde wiederum auf einer Stange befestigt, die als Halterung des kompletten Segments dient. Insgesamt wurden 8 solcher Segmente in der Werkstatt des Instituts angefertigt und auf Reitern einer optischen Strahlführungsschiene angeordnet (vgl. Abb. 3.4). Auf dieser Schiene wurde zusätzlich ein Reiter mit einer grünen Laserdiode hinzugefügt, um die gespeicherten Teilchen über Streuung im Laserstrahl sichtbar zu machen. Damit der Laser nachträglich auf die Achse, in der die Teilchen gefangen werden, justiert werden kann, ist der Laser in x - und y - Richtung variabel positionierbar und in zwei Raumrichtungen kippbar. Weiterhin befindet sich aus Laserschutzgründen am Ende des Modells ein Strahlauffänger für den Laserstrahl. Dies soll verhindern, dass die Schüler direkt in den Strahl hineinschauen können.

Um die Teilchen in den einzelnen linearen Fallen zu speichern, wird an jeweils zwei diagonal gegenüber liegenden Elektroden eine Wechselspannung von etwa 3,5 kV mit einer Frequenz von zirka 50 Hz angelegt (Wechselspannungselektroden, rote Kabel in Abb. 3.3) und die anderen beiden Elektroden werden geerdet (Gleichspannungselektrode, schwarze Kabel in Abb. 3.3). Gemäß Kap. 2.2.3 wirkt nun entlang der Symmetrieachse der zweidimensionalen, linearen Falle keine Kraft auf die Teilchen, die nun prinzipiell

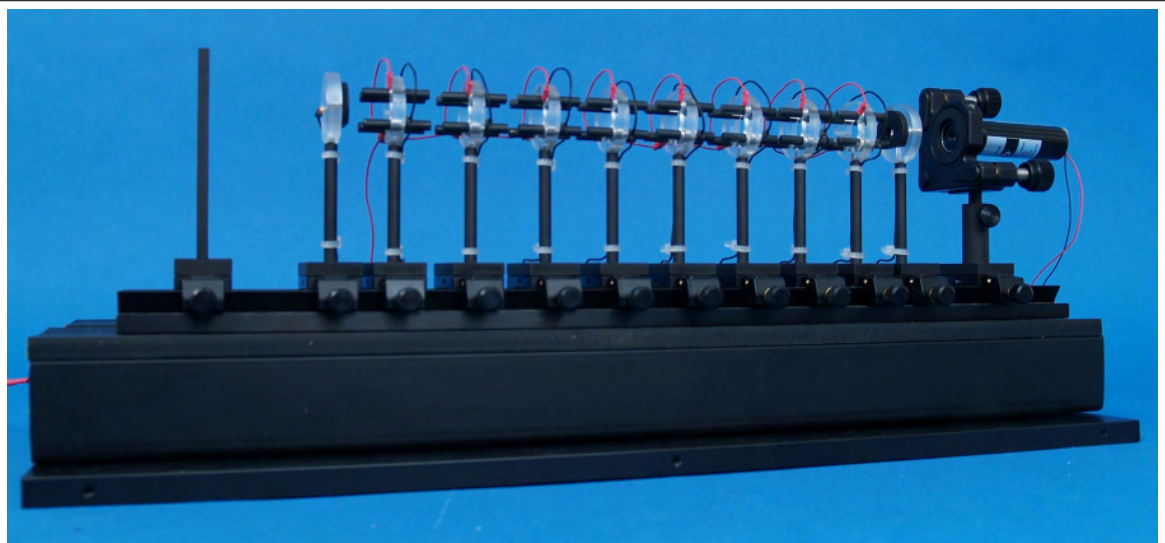
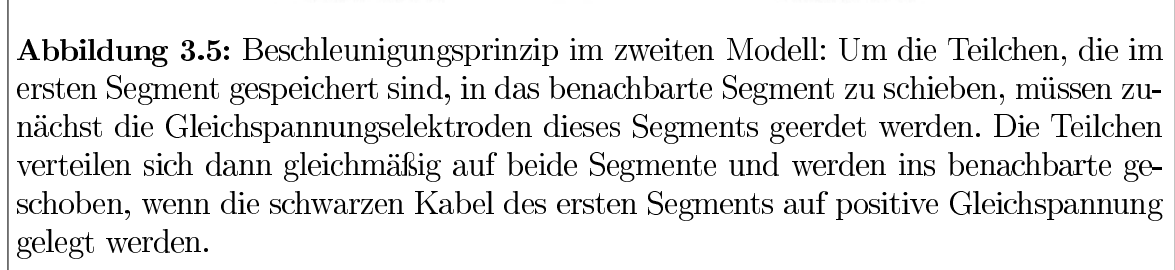


Abbildung 3.4: Aufbau des zweiten Modells: Mehrere lineare Fallen wurden hintereinander gereiht, sodass sich die Teilchen entlang der horizontalen Achse frei bewegen können.

entlang dieser Achse leicht bewegt werden können. Kappenelektroden auf Gleichspannungspotential vor dem ersten und hinter dem letzten Fallensegment speichern dabei die Teilchen dabei auch in den äußeren Segmenten. Das Speichern der Teilchen entlang der Symmetrieachse ist mit dem in Kap. 3.1 beschriebenen Netzgerät grundsätzlich möglich. Um nun allerdings die Teilchen von einem Segment in das benachbarte zu bewegen und damit einen Schritt in Richtung eines funktionierenden Beschleunigermodells zu realisieren, war es notwendig ein neues Netzgerät zu entwickeln (vgl. Abb. 3.6). Dieses muss zum einen die Wechselspannung variabler Amplitude im Kilovoltbereich bei etwa 50 Hz liefern, die zum Speichern der Teilchen benutzt werden kann. Zum axialen Bewegen der Teilchen ist es zusätzlich notwendig, dass die auf Masse liegenden Segmentstäbe per Knopfdruck am Netzgerät auf eine gewünschte Gleichspannung gelegt werden können.

Ein Beschleunigungsprozess läuft dann folgendermaßen ab: Anfangs sind alle Teilchen im ersten Segment des Teilchenbeschleunigermodells gespeichert. Dazu liegen die Gleichspannungselektroden des ersten Segmentes auf Erde und alle anderen Gleichspannungselektroden liegen auf positiver Gleichspannung von etwa 1,5 kV bis 2 kV. Um die Teilchen nun in das benachbarte Segment zu schieben, müssen dessen Gleichspannungselektroden zunächst geerdet werden, so dass sich die größtenteils positiven Teilchen gleichmäßig in beiden Segmenten verteilen können. Legt man nun das ursprüngliche Segment auf positive Gleichspannung, so wandern die Teilchen in die Potentialmulde des benachbarten zweiten Segmentes. Dieses Verfahren wird in Abb. 3.5



sätzlich bietet das Netzgerät die Option, die Teilchen automatisch zwischen dem ersten und letzten Segment zu bewegen. Dabei kann zwischen unterschiedlichen Geschwindigkeiten gewählt werden, mit der sich die Teilchen von Segment zu Segment bewegen. Die Gleichspannung zum Bewegen der Teilchen ist dabei positiv gewählt, da bei der Reibung der Bärlappsporen an den Elektroden bevorzugt positiv geladene Teilchen entstehen.



Abbildung 3.6: Das verwendete Netzgerät liefert eine Wechselspannung variabler Amplitude im Kilovoltbereich bei einer festen Frequenz von 50 Hz, die zum Speichern der Teilchen benutzt werden. Zusätzlich liefert es eine regelbare Gleichspannung im Kilovoltbereich zum Bewegen der Teilchen innerhalb des Modells.

Mit diesem Aufbau ist es somit möglich, eine schrittweise Bewegung der Teilchen von Segment zu Segment zu erzielen und die Teilchen somit von Segment zu Segment zu beschleunigen. Manuell kann diese Verschiebung und damit Beschleunigung sogar entlang des gesamten Modells fortgeführt werden und möglicherweise auch eine höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Um den Schülern jedoch neben dem Beschleunigungsprinzip eines Teilchenbeschleunigers auch die Notwendigkeit stetig in der Länge anwachsender Segmentstäben bei fester Umschaltfrequenz (vgl. Kap. 2.1.4) begreiflich zu machen, wurde ein drittes Modell entwickelt, bei dem die Segmentstäbe immer länger werden.

3.3 Drittes Modell - Alvarezstruktur

Dieses dritte Modell ist grundsätzlich analog dem zweiten aufgebaut. Es werden erneut lineare Paulfallen auf einer Schiene hintereinander gereiht, jedoch wird hier die Länge der Elektroden variiert (vgl. Abb. 3.7). Die ersten und kürzesten Elektroden haben eine Länge von 10 mm und bis zum 8. Segment nimmt diese jeweils um 5 mm zu, so dass die letzten Elektroden eine Länge von 45 mm haben. Um bei diesem Modell einen besseren Blick in die Fallensegmente zu gewährleisten, wurde die bisherige horizontal/vertikal Anordnung der Quadrupolstäbe durch ein Abknicken der Haltestäbe um 45° zu einer karoförmigen Struktur gekippt.

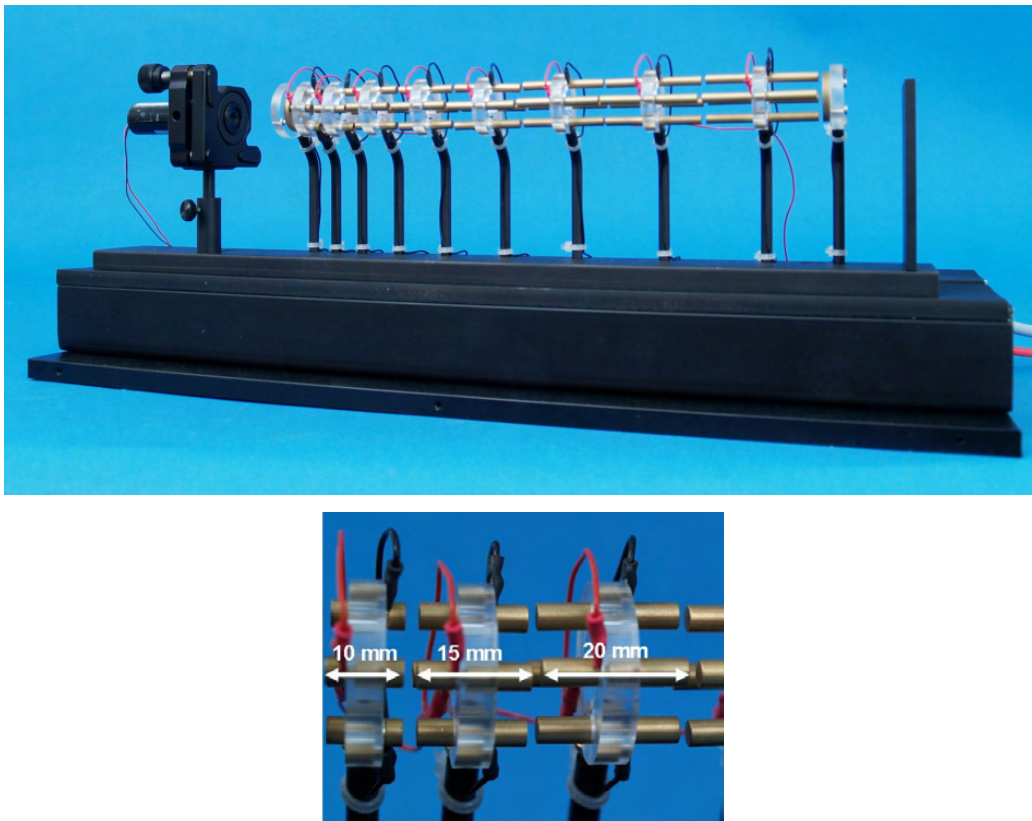


Abbildung 3.7: Kompletter Aufbau und Fallensegmente des dritten Modells: Die Elektroden der hintereinander gereihten linearen Fallen werden entlang der Symmetrieachse stetig länger.

Wie schon in Kap. 3.2 erwähnt, ist es mit diesem Modell möglich, den Schülern neben dem Beschleunigungsprinzip auch die Notwendigkeit stetig in der Länge anwachsender Segmentstäbe zur Beschleunigung bei fester Umschaltfrequenz und schneller werdenden Teilchen begreiflich zu machen.

4 Einsatz der Modellexperimente im Schülerprojekt

Nachdem in Kap. 3 die Entwicklung der Teilchenbeschleunigermodelle beschrieben wurde, wird nun deren Einsatz in dem in dieser Arbeit entwickelten Schülerprojekt vorgestellt. Dazu wird zunächst das allgemeine Konzept des Projektes, wozu etwa die erwarteten fachlichen Vorkenntnisse und der grobe zeitliche Rahmen gehören, beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Projektbausteine dargestellt und die dazugehörigen Arbeitsblätter erläutert, die zudem als Kopiervorlage im Anhang zu finden sind. Dort finden sich auch einige Anregungen für Lehrer, die nicht die Gelegenheit haben, das Projekt im Rahmen eines Besuches an der Universität in Mainz durchzuführen. In diesem Teil wird der Bau einer eigenen Paulfalle mit gewöhnlichen und preisgünstigen Materialien, etwa aus dem Kaufhaus, beschrieben, so dass die Paulfalle ohne Probleme in den Physikunterricht eingebracht werden kann.

4.1 Konzept des Schülerprojektes

4.1.1 Voraussetzungen

Zur Durchführung des Projektes im Schülerlabor ist kein konkretes Fachwissen über Teilchenbeschleuniger oder Paulfallen notwendig. Die teilnehmenden Schüler erhalten eine einführende Vorlesung über Paulfallen, in der die erforderlichen Grundlagen behandelt werden. Das Prinzip des Teilchenbeschleunigers wiederum wird mithilfe der Modelle und dazugehörigen Arbeitsblättern gemeinsam erarbeitet.

Um die theoretischen Hintergründe zu den Experimenten zu verstehen, ist es unerlässlich, dass die Schüler grundsätzlich mit Begriffen wie „Kraft“, „elektrische Ladung“, „elektrisches Feld“ und „elektrische Spannung“ umgehen können. Das bedeutet, dass die Inhalte der im Lehrplan von Rheinland - Pfalz vorgesehenen Bausteine „Elektrizität I“ und „Elektrizität II“ im Grundfach (vgl. Abb. 4.1) bzw. „Elektrische Wechselwirkung I“ und „Elektrische Wechselwirkung II“ im Leistungsfach (vgl. Abb. 4.2) bekannt sein sollten. Optimal wäre somit ein Kurs der Jahrgangsstufe 12 oder 13. Diese Kurse haben zudem den Vorteil, dass die Anzahl der Schüler in den meisten Fällen nicht zu groß ist und somit ein angenehmes Arbeiten auch bei nur geringer Anzahl von ein bis zwei funktionsfähigen Modellen möglich ist. Erfahrungsgemäß ist das Projekt mit maximal 12 Schülern noch gut durchführbar.

Durchgeführt wird das Projekt im Institut für Physik in der Arbeitsgruppe LARISSA (Laser Resonance Ionization Spectroscopy for Selective Trace Analysis) an der Johan-

Elektrizität I	
<ul style="list-style-type: none"> - elektrische Ladung; Stromstärke; - elektrische Influenz - elektrisches Feld; Feldstärke - elektrische Spannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Einen ausreichenden Phänomenbereich aufzeigen und einen Einblick in die Tragfähigkeit des Feldkonzeptes geben. • Die Behandlung des homogenen Feldes reicht aus. Den Zeitrahmen nicht durch überdehnte Wiederholungen der Inhalte aus der Sekundarstufe I gefährden.
Elektrizität II	
<ul style="list-style-type: none"> - Bewegung einer Punktladung im elektrischen Feld - Kondensator; Kapazität 	<ul style="list-style-type: none"> • Begriffliche Grundkenntnisse und Formeln bereitstellen und üben. • Dieser Baustein dient der Übung. Das Methodenlernen fördern. • Praktikum: Kondensatorentladung

Abbildung 4.1: Empfohlene Bausteine in der Qualifikationsphase des Grundfaches

Elektrische Wechselwirkung I	
<ul style="list-style-type: none"> - elektrische Ladung; Stromstärke - elektrische Influenz - Coulomb-Wechselwirkung - Radialfeld; elektrische Feldstärke 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundkenntnisse und ein strukturierendes Überblickswissen bereitstellen. • Die Begrifflichkeit kann auch über das homogene Feld angegangen werden. Den Zeitrahmen nicht durch überzogene Rechnungen gefährden.
Elektrische Wechselwirkung II	
<ul style="list-style-type: none"> - Bewegung einer Punktladung im homogenen elektrischen Feld - Kondensator - elektrische Feldenergie - Elementarladung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ein solides Grundwissen vermitteln. • Beabsichtigte Vertiefungen und Ergänzungen sind in Verbindung mit dem Wahlbaustein Teilchen in Feldern möglich. • Praktikum: Äquipotentiallinien

Abbildung 4.2: Empfohlene Bausteine in der Einführungsphase des Leistungsfaches

nes Gutenberg - Universität in Mainz, in der seit mehreren Jahren Projekte dieser Art angeboten werden. Diese Aktivität an der Universität Mainz ist dabei nur ein Baustein in der Vielzahl an Initiativen, die in irgendeiner Form außerschulisches Lernen anbieten. Gerade seit den Ergebnissen der internationalen Bildungsstudien TIMSS und PISA werden solche außerschulischen Lernprojekte, zu denen Schülerlabore wie das hier vorgestellte zu rechnen sind, verstärkt angeboten. Zwar wäre es generell auch denkbar, solche Projekte in der Schule selbst durchzuführen, jedoch gibt es mehrere Gründe, die für eine Verwirklichung in einem Schülerlabor, etwa an einer Universität, sprechen. Zu den Vorteilen gehört sicherlich die authentische Forschungsumgebung, in welcher die Experimente durchgeführt werden können. Diese wird zum einen durch die forschungsnahen Experimente und zum anderen durch den persönlichen Kontakt zu aktiven Wissenschaftlern geschaffen. Die Laborbesucher erfahren somit die Faszination und die Bedeutung der Forschung aus erster Hand, wodurch der sonst oft abstrakte, trockene und langweilige Physikunterricht zum „Wissenschaftsfach“ aufgelockert wird. Eine systematische Evaluation zur Wirkung solcher Schülerlabore auf das Interesse und das Verständnis der Schüler an Wissenschaften ist in der Dissertation von Katrin Engeln mit dem Titel „Schülerlabors“ [Eng04] oder in [Eul05] zu finden. Die darin erhobenen Daten zeigen, dass diese Schülerlabore das Potential haben - bei Schülerinnen und Schülern gleichermaßen - das Interesse an den Naturwissenschaften und Technik zu wecken. Das selbsttätige Experimentieren in diesen Laboren, das auch in dem in dieser Arbeit entwickelten Projekt ein wesentlicher Aspekt ist und bei dem die Schüler sich als kompetent erleben und neues Wissen erwerben, wird dabei den Daten zufolge gut angenommen.

4.1.2 Zeitlicher Rahmen

Der zeitliche Rahmen des Projektes umfasst einen kompletten Arbeitstag, der inhaltlich in zwei Teile geteilt ist. Während morgens die Paulfalle im Vordergrund steht, liegt der thematische Schwerpunkt nach einer Mittagspause in der Mensa auf den Beschleunigerstrukturen. Ein möglicher Zeitplan ist in Tab. 4.1 zu finden.

Nach einer kurzen Begrüßung der Schüler erhalten diese einen Einführungsvortrag über die theoretischen Grundlagen und die Anwendungen von Paulfallen, der ungefähr eine halbe Stunde dauert. Nach dieser für die Schüler eher passiven Einführung per Frontalunterricht dürfen die Projektteilnehmer nun selbst aktiv werden. Beim Umgang mit den grob vorbereiteten Materialien und den Lötkolben ist beim Bau der Paulfallen in Kleingruppen das praktische Geschick der Schüler gefragt. Die maximale Gruppengröße hängt dabei vor allem von den Betreuern und den Räumlichkeiten ab. Für die Arbeit mit dem linearen Beschleunigermodell ist jedoch eine nicht zu große Gruppengröße von maximal 6 Schülern wünschenswert, um eine angenehme und produktive Arbeitsatmosphäre an den Teilchenbeschleunigermodellen gewährleisten zu können. Eine Aufteilung

in Gruppen bietet sich daher in diesem Projektteil an. Gruppe A beschäftigt sich zunächst mit den Teilchenbeschleunigermodellen, während Gruppe B in dieser Zeit ein Arbeitsblatt zu einer Anwendung des Teilchenbeschleunigers bearbeitet. Für diesen Teil ist sowohl für Gruppe A als auch für Gruppe B etwa eine Stunde vorgesehen, so dass nach dieser Zeit die Gruppen getauscht werden können. Sollten nicht alle Schüler alle Anwendungen kennengelernt haben, ist eine kurze Präsentation der jeweiligen aktiven Untergruppe vor der Gesamtgruppe vorgesehen. Das Vorbereiten und das Vorstellen einer Präsentation und der Umgang mit Power - Point - Präsentationen ist somit eine weitere Kompetenz, die im Rahmen dieses Projektes gefördert wird. Zudem erhalten die Schüler durch das Vorstellen einer Präsentation ein tiefergehendes Verständnis des behandelten Themas, da dieses beim Vorbereiten nochmals intensiver behandelt wird. Die gerade beschriebene Vorgehensweise der Gruppenaufteilung mit anschließender Präsentation der Ergebnisse in der ganzen Gruppe hat sich unter anderem schon in dem Projekt „Pep - Physik erfahren im Forschungs - Praktikum“, das seit mehreren Jahren mit sehr viel positiver Resonanz in der Arbeitsgruppe LARISSA an der Universität in Mainz angeboten wird, bewährt. Auf diese Art ist das effektive Arbeiten in kleinen Gruppen gewährleistet und zudem erfahren alle Schüler das Wichtigste aller Projektbausteine noch einmal zusammengefasst.

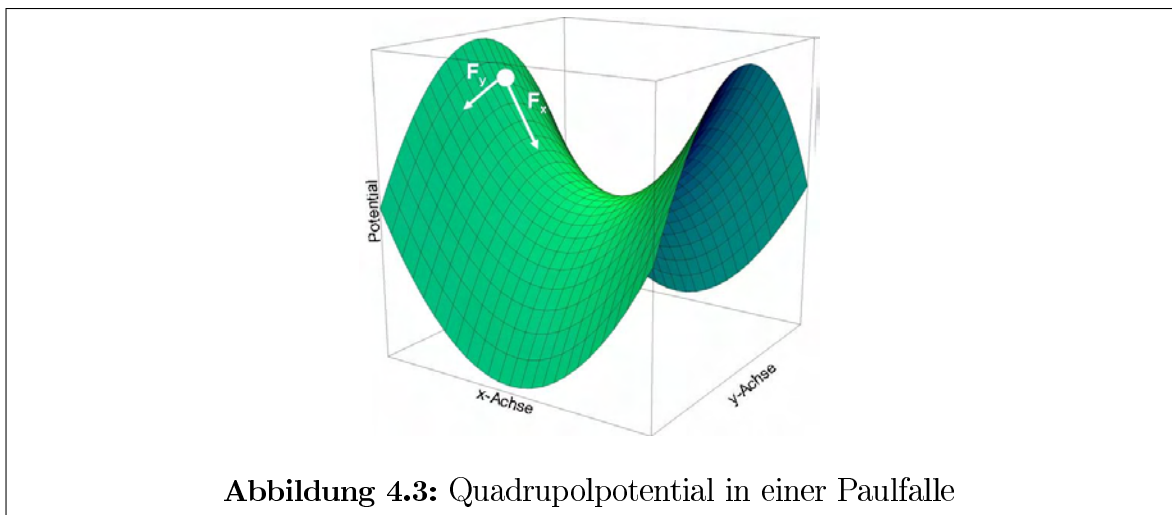
8 : 30 - 8 : 45	Begrüßung
8 : 45 - 9 : 15	Einführungsvortrag
9 : 15 - 11 : 15	Bau der Paulfallen
11 : 30 - 12 : 30	Gruppe 1: Teilchenbeschleunigermodell Gruppe 2: Anwendung 1
12 : 30 - 13 : 30	Mittagspause
13 : 30 - 14 : 30	Gruppe 1: Anwendung 2 Gruppe 2: Teilchenbeschleunigermodell
14 : 30 - 15 : 00	Präsentation der Ergebnisse

Tabelle 4.1: Zeitlicher Ablauf des Schülerpraktikums

4.2 Projektbausteine

4.2.1 Einführungsvortrag

Das in dieser Arbeit entwickelte Projekt beginnt mit einer kurzen Vorlesung, in der die Schüler einen Einblick in die Anwendungen und die Theorie von Paulfallen erhalten. Diese Vorlesung findet in Form eines Power - Point - Vortrages statt, der als Anhang dieser Arbeit beigelegt ist. Anfangs wird den Schülern die Bedeutung von Paulfallen in der aktuellen Forschung und den Anwendungen bewusst werden, wobei ausschließlich das Wissen vorausgesetzt wird, dass es sich bei der Paulfalle um einen Käfig für geladene Teilchen handelt. Erst nach diesem Anreiz wird das Grundprinzip einer Paulfalle erläutert - jedoch ohne auf die vollständigen mathematischen Hintergründe etwa der Mathieu'schen Bewegungsgleichungen oder die Stabilitätsparameter einzugehen. An dieser Stelle soll lediglich das Grundprinzip verstanden werden: Wie in Kap. 2.2.2 erläutert, benötigt man ein zeitlich wechselndes, räumlich in quadrupolarer Geometrie ausgebildetes Potential, um ein geladenes Teilchen harmonisch zu speichern. Dieses Quadrupolpotential kann man den Schülern zunächst in statischer Form anhand einer Zeichnung vor Augen führen. Um den Schülern die Teilchenbewegung in einem solchen Feld begreiflich zu machen, kann man das Potential zunächst als topographische Karte (Gebirge oder Sattel) beschreiben (vgl. Abb. 4.3):



Eine Kugel, welche sich an einer hochgelegenen Stelle des abgebildeten „Sattels“ befindet, rollt diesen schräg herunter. Sie erfährt dabei eine fokussierende Kraft F_x zum Sattelmittelpunkt, aber auch eine defokussierende Kraft F_y vom Sattelmittelpunkt weg. Die Kugel würde also aus dem „Gebirge“ herausrollen. Analog würde ein geladenes Teilchen dieses statische Quadrupolpotential verlassen.

Für den Schüler ist es nun sehr anschaulich, dass man das Verlassen der Falle verhindern kann, wenn man die Sattelform einfach früh genug umklappt, also die Polarität wechselt. Wenn nun die Polarität mit ausreichend hoher Frequenz wechselt, bleibt eine resultierende rücktreibende Bewegung in Richtung zum Symmetriepunkt dieser zweidimensionalen Repräsentation bestehen. Diese Tatsache kann zusätzlich mittels eines dynamischen Applets aus dem Internet (<http://www.mpq.mpg.de/mpq-events/2001-open-door/atomuhr-dateien/potential.gif>) verdeutlicht werden. Wo diese resultierende Fokussierung herkommt, kann anhand des optischen Analogons aus Kap. 2.3 anschaulich erklärt werden.

Eine geeignete Frequenz zur Speicherung eines Teilchens kann man den Schülern mit folgendem Gedankenexperiment vorführen: „Stelle dir vor, du wolltest auf einem Tennisschläger zunächst eine leichte Kugel und danach eine schwere Kugel an einem bestimmten Punkt des Schlägers durch die richtigen Bewegungen des Schlägers „fixieren“. Für jeden ist es einleuchtend, dass der Schläger schneller hin und her bewegt werden muss, wenn man eine leichte statt eine schwere Kugel an einem Punkt lokalisieren möchte. Dies liegt daran, dass die leichte Kugel aufgrund geringerer Trägheit schneller in Bewegung gesetzt wird.

Mit dieser Überlegung können Schüler leicht nachvollziehen, dass die Frequenz von der Masse m abhängt. Je größer $\frac{e}{m}$ ist, d.h. je kleiner die Masse im Vergleich zur Ladung ist, desto häufiger muss die Polarität geändert werden. Es gilt also

$$\frac{e}{m} \propto \omega \quad ,$$

entsprechend der Formel der Stabilitätsparameter aus Kap. 2.2.3.

Ähnliches kann man sich für den Betrag der Wechselspannung überlegen. Es ist auch hier einleuchtend, dass die notwendige Kraft F gemäß dem zweiten Newton'schen Axiom $F = m \cdot a$ proportional zur Masse m sein muss. Die Spannung V muss daher bei konstantem ω und größerem $\frac{e}{m}$ kleiner gewählt werden, d.h.

$$\frac{e}{m} \propto \frac{1}{V} \quad .$$

Zur Motivation der Schüler werden sowohl eine lineare (vgl. Abb. 4.5) als auch eine punktsymmetrische Falle (vgl. Abb. 4.4) im Vorlesungsraum aufgebaut, deren Funktionsfähigkeit zu geeignetem Zeitpunkt demonstriert werden kann. Hier kann zudem erklärt werden, dass bei den verwendeten Paulfallen einige Vereinfachungen gemacht wurden.

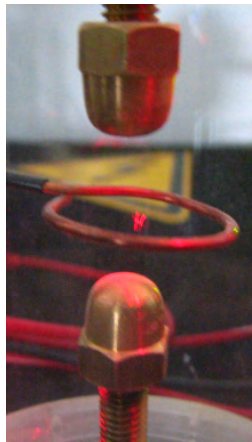


Abbildung 4.4: Punktsymmetrische Falle für Makroteilchen

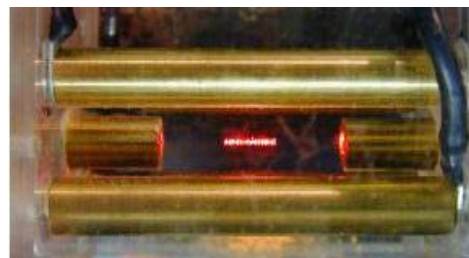


Abbildung 4.5: Lineare Falle für Makroteilchen

4.2.2 Bau einer Paulfalle

Um den praktischen Aspekt, der im Unterricht aus Zeitgründen oder wegen fehlender Werkzeuge und/oder Materialien oft zu kurz kommt hervorzuheben, bekommen die Schüler in dem hier vorgestellten Projekt die Möglichkeit selbst tätig zu werden. Mit relativ einfachen Mitteln soll hier selbständig eine Falle für makroskopische Teilchen gebaut werden. Zum Bau der Paulfallen wurden dabei folgende Materialien verwendet: 2 Kappenelektroden, 1 Ringelektrode, Bananenkabel, 2 Stecker, 1 Widerstand ($1\text{ M}\Omega$), 3 kleine Lötösen, 1 Nygonschraube ($\text{M6} \times 40\text{ mm}$) mit 7 passenden Nylonmuttern, 1 Lüsterklemme, 2 runde Holzteller, 1 Plexiglaszylinder und ein Laserhalter (vgl. Abb. 4.6). Im Anhang wird beschrieben, wie diese Paulfallen auch mit gewöhnlichen und preisgünstigen Materialien aus dem Kaufhaus gebaut werden können.

Am Projekttag sind diese Materialien auf einer den Schülern ausgeteilten Bauanleitung zusammen mit den einzelnen Arbeitsschritten aufgelistet. Gewöhnlich sind die Materialien schon auf einem Tisch vorbereitet, so dass die Schüler sich anhand der Bauanleitung die einzelnen Materialien zusammensuchen können.

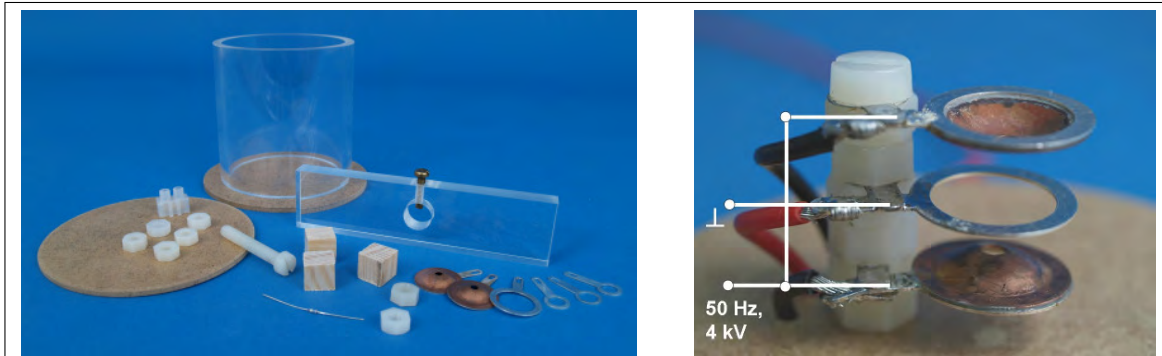


Abbildung 4.6: Materialien und fertige selbstgebaute punktsymmetrische Paulfalle

Als Ringelektrode wird dabei eine handelsübliche relativ große Lötfahne mit etwa 1,5 cm Innendurchmesser verwendet. Die Kappenelektroden hingegen werden vor dem Projekt in der Werkstatt angefertigt. Dazu wird ein Kupferblech kreisförmig ausgestanzt, mit einem Loch versehen und kugelförmig ausgebeult. Dieses Kupferstück wird dann auf eine weitere Lötfahne gelötet und dient als Kappenelektrode. Wie aber im Anhang noch gezeigt wird, genügt es sogar, eine handelsübliche Unterlegscheibe in passender Größe als Kappenelektrode zu verwenden, um ein Speichern der Teilchen zu erreichen. Die soeben beschriebenen Elektroden der punktsymmetrischen Falle werden jeweils an eine kleinere Lötfahne gelötet und mit einem Kabel versehen. Um die Elektroden nun wie gewünscht anzuordnen, werden sie mit der kleineren Lötfahne auf eine Ny-lonschraube gesteckt. Dabei sind zwischen den Elektroden jeweils zwei Nylonmuttern erforderlich, um den Abstand groß genug zu halten. Bevor die Schüler an dieser Stelle weiterarbeiten, sollte der Betreuer die Lötkontakte kontrollieren und überprüfen, ob die Anordnung der Elektroden korrekt ist.



Abbildung 4.7: Schüler beim selbstständigen Fallenbauen

Der Boden der Falle, auf dem die Schraube befestigt werden soll, ist ein Holzteller mit etwa 10 cm Durchmesser. Die im Boden notwendigen Bohrungen für Schraube und Kabel werden von den Schülern so angebracht, dass die Elektroden später mittig auf dem Holzteller platziert werden können. Sind die Löcher fertig gebohrt, wird die Schraube mit einer Mutter auf dem Holzteller befestigt werden. Die Kabel werden durch die anderen drei Löcher im Boden geführt, so dass der Plexiglaszylinder plan aufliegt, ohne zu wackeln. Nur so sind die Teilchen in der Falle beim Betrieb vor Luftbewegungen geschützt und ein Berühren der Elektroden durch die Schüler kann sicher verhindert werden. Damit die gesamte Anordnung plan auf dem Tisch steht, wird noch ein zweiter Holzteller von unten mittels Abstandshalter an den oberen Holzteller geklebt.



Abbildung 4.8: Schüler beim Testen der selbstgebauten Fallen

Es ist sinnvoll, die Anschlusskabel, die später auf einem Potential liegen, d.h. die Kabel der Kappenelektroden bereits im Unterbau der Falle in einer Lüsterklemme zusammenzuführen. Aus Sicherheitsgründen, ist es beim Bau der Falle mit Schülern wichtig, in den Stecker der Hochspannungselektrode einen Widerstand zu löten, der bei einem versehentlichen Berühren der Elektroden den Strom auf einen ungefährlichen Wert begrenzt. Sind all diese genannten Schritte ausgeführt, wird der Plexiglaszylinder zum Schutz aufgesetzt. Erst dann können die Schüler unter Aufsicht Spannung an die Elektroden legen und das Speichern der Teilchen testen. Neben Bärlappsporen stehen den Schülern auch Kakao, Paprika, Backpulver und Mehl zur Verfügung.

4.2.3 Modell eines Teilchenbeschleunigers

In diesem Projektteil dürfen die Schüler selbst an den in Kap. ?? beschriebenen Teilchenbeschleunigermodellen experimentieren. Ziel ist es, die Funktionsweise eines Teilchenbeschleunigers anhand dieser Modelle selbstständig zu erarbeiten und zu verstehen. Als Hilfestellung wird ihnen dazu ein Arbeitsblatt mit Hinweisen und Aufgaben an die Hand gegeben, welches dem Anhang dieser Arbeit beigelegt ist. Auf diesem wird zunächst eine Definition eines Teilchenbeschleunigers angeführt: „Um geladene Teilchen (z.B. Elementarteilchen, Atomkerne oder ionisierte Atome, Moleküle und Mole-

kühlbruchstücke) auf Trab zu bringen, d.h. sie zu beschleunigen, benutzt man sogenannte Teilchenbeschleuniger. Je nach Teilchenart und Beschleunigertyp können in diesem Gerät Geschwindigkeiten bis nahe der Lichtgeschwindigkeit erreicht werden. Die Teilchen erlangen dabei eine Bewegungsenergie (kinetische Energie), die einem Vielfachen ihrer eigenen Ruhemasse entspricht. “

In der ersten Aufgabe sollen sich die Schüler damit auseinandersetzen, welche Kraft zur Beschleunigung von geladenen Teilchen geeignet ist (vgl. Kap. 2.1.2). Dazu erhalten sie eine Tabelle, in welcher die vier fundamentalen Kräfte der Natur samt ihren wichtigsten Eigenschaften aufgelistet sind (vgl. Tab. 2.2).

Um die Schüler dann zunächst mit dem Aufbau (vgl. Abb. 3.4) vertraut zu machen, erhalten sie die Aufgabe die Bärllappsporen entlang der ganzen Achse des zweiten Teilchenbeschleunigermodells zu fangen. Dazu müssen sie auf die Erläuterungen aus dem Einführungsvortrag zurückgreifen und jeweils zwei gegenüberliegenden Elektroden auf eine Wechselspannung legen und die anderen beiden Elektroden erden.

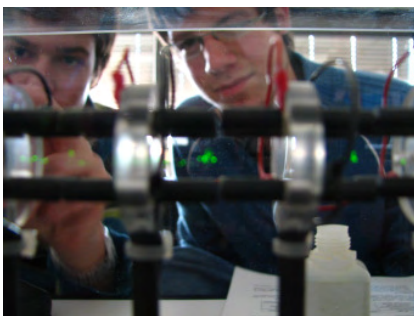


Abbildung 4.9: Schüler beim selbstständigen Experimentieren mit dem Teilchenbeschleunigermodell

Nach diesem Herantasten an den Aufbau, kann man den Schülern die Aufgabe geben, die Teilchen nur in einem Fallensegment zu fangen. Gelingt dies nicht, kann auf Aufgabe 3 des Arbeitsblattes zurückgegriffen werden, in der eine Beschaltung vorgegeben ist. Die Schüler können zunächst Vermutungen äußern, wo sich die Teilchen bei dieser Beschaltung aufhalten werden. Mit dem zur Verfügung stehenden Aufbau können sie diese Vermutungen direkt verifizieren oder falsifizieren, das Experiment somit als Bestätigung ihrer Vermutung nutzen. Natürlich besteht auch die Möglichkeit die Beschaltung direkt im Experiment zu verändern und zu beobachten, was passiert. Die Schüler sollen sich danach auf jeden Fall Gedanken machen, ob die Beobachtungen am Modell Sinn ergeben. Wenn die Teilchen dann in einem Segment gefangen sind, kann den Schülern die Aufgabe gestellt werden, die Teilchen in das benachbarte Segment zu schieben. Gelingt dies, so kann man diesen Schritt bereits als „Beschleunigung“

werten. Die Schüler sollen dann selbständig versuchen, die weitere Verschiebung und „Beschleunigung“ entlang des gesamten Modells fortzuführen und dabei auch höhere Geschwindigkeiten zu erreichen.

In einer weiteren Aufgabe des Arbeitsblattes sollen sich die Schüler überlegen, welche Konsequenzen es hat, wenn die Teilchen immer schneller werden und man die Segmente in einer festen Frequenz umschaltet. Die daraus erwachsende Notwendigkeit stetig in der Länge wachsender Segmentstäbe entlang der Beschleunigungsstrecke bilden eine Überleitung zu dem dritten Beschleunigermodell (vgl. Kap. 3.3), das an dieser Stelle diskutiert werden kann.

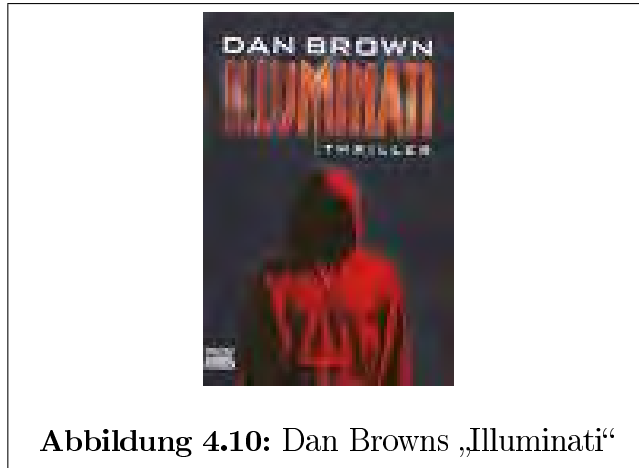
Als weiterführende Transferaufgabe kommt das erste, nicht optimale Teilchenbeschleunigermodell zum Einsatz (vgl. Kap. 3.1). Die Schüler sollen sich dort überlegen, wie die einzelnen Segmente beschaltet werden müssen, um die Teilchen zu speichern. Auch hier muss auf die Erläuterungen aus der Einführungsvorlesung oder auf den Projektteil, in dem die eigenen Fallen gebaut wurden, zurückgegriffen werden. Ist dies am Experiment selbst getestet, kann gemeinsam mit den Schülern überlegt werden, warum dieses erste Modell als Teilchenbeschleuniger nicht geeignet ist.

4.2.4 Anwendungen eines Teilchenbeschleunigers

Ein wesentlicher Aspekt des Projekttages stellt auch die Vorstellung und Diskussion von Anwendungen von Teilchenbeschleunigern dar. Diese sollten das Interesse und die Begeisterung an Experimenten weitertragen und den Stellenwert der Modelle in den Augen der Schüler erhöhen. Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Projektes stehen den Schülern zwei Anwendungsgebiete - Antimaterieerzeugung und -speicherung und Ionenstrahlentherapie - zur Verfügung, von denen sie eines näher durchleuchten dürfen.

Antimaterie

Als ein Anwendungsgebiet von Teilchenbeschleunigern in der Grundlagenforschung wird in dem Schülerprojekt die Erforschung von Antimaterie angesprochen. Dies geschieht anhand eines Arbeitsblattes, auf welchem zunächst Informationen zur Antimaterie zusammengefasst dargestellt und schließlich Fragen zu diesem Text formuliert sind. Als Motivation wird die Gestaltung des Arbeitsblattes an das von Dan Brown geschriebene Buch „Illuminati“ angelehnt, das monatelang weltweit die Bestsellerlisten beherrschte (siehe Abb. 4.10) [Bro03]. Dieses Arbeitsblatt hat somit einen sehr aktuellen und spannenden Bezug und es ist anzunehmen, dass schon einige Schüler vom Thema „Antimaterie“ gehört, das Buch gelesen oder anderweitig ein Interesse an diesem Thema entwickelt haben.



In der fiktiven Geschichte des Buches „Illuminati“ entwendet ein Geheimbund von Wissenschaftlern und Freidenkern, die sogenannten „Illuminati“, ein Gramm Antimaterie aus einem Labor des CERN (**C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire), der größten europäischen Forschungseinrichtung für Kern - und Elementarteilchenphysik in Genf. Die entwendete und in Teilchenfallen gespeicherte Antimaterie soll dazu verwendet werden, den gesamten Vatikan zu vernichten und sich somit an dem „alten Feind“ der Wissenschaft - der katholischen Kirche - zu rächen.

Das für die Schüler entwickelte Arbeitsblatt beginnt mit einem Zitat aus Dan Browns Bestseller: „Antimaterie ist die größte bekannte Energiequelle. Die Reaktion von Antimaterie führt zu einer vollständigen Freisetzung sämtlicher enthaltenen Energie (Wirkungsgrad: 100 %. Kerspaltung: 1,5 %). Antimaterie erzeugt weder Umweltverschmutzung noch Strahlung, und ein winziger Tropfen würde reichen, um New York einen ganzen Tag lang mit Energie zu versorgen. [Bro03]“

Dieses Zitat soll die Schüler dazu anregen die darin enthaltenen Aussagen im Folgenden zu hinterfragen. Die erste Frage, die sich ein Leser des Thrillers „Illuminati“ stellen könnte, wäre, ob es Antimaterie überhaupt wirklich gibt. Sie wird durch den Infotext des Arbeitsblattes direkt beantwortet, indem kurz auf die historische Entwicklung der Erforschung der Antimaterie eingegangen wird. Diese begann bereits 1928, als Paul Dirac die Existenz von Antimaterie theoretisch vorhersagte. Er stieß auf die Lösung einer Gleichung, die er nur verstehen konnte, wenn es neben dem Elektron auch ein Teilchen mit gleichen Eigenschaften aber positiver Ladung gäbe - das Antiteilchen des Elektrons. 1932 gelang es schließlich Carl Anderson dieses von Dirac vorhergesagte Teilchen - das Positron - in einer Nebelkammer nachzuweisen. Dort beobachtete er, wie ein Teilchen, das sich im Magnetfeld wie ein Teilchen mit positiver Ladung aber gleicher Masse wie ein Elektron verhielt (vgl. Abb. A.0). Daher konnte sich Anderson

sicher sein, dass es sich tatsächlich um das Antiteilchen des Elektrons handelte.

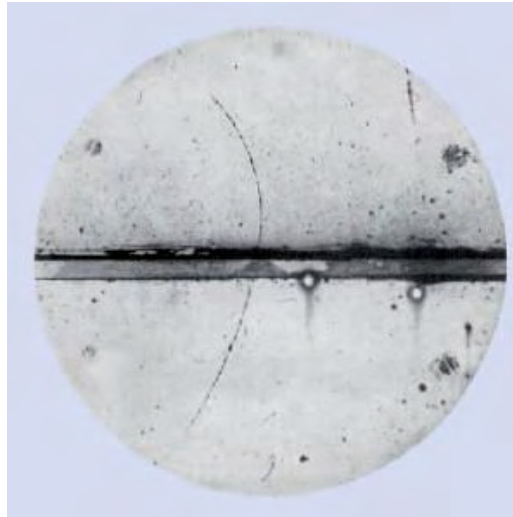


Abbildung 4.11: Anhand der Krümmung der Teilchenbahnen in der Nebelkammer wies C. Anderson das Antiteilchen des Elektrons nach (entnommen aus [GOW06]).

Jahre später - 1955 und 1959 - gelang es schließlich auch das Antiproton und das Antineutron zu entdecken. 1959 waren damit alle Grundbausteine der „Antiwelt“ nachgewiesen. Die gezielte Herstellung von Antiwasserstoffatomen aus Antiproton und Positron gelang allerdings erst 1995 und bis heute werden unter anderem am CERN Experimente mit diesen einfachsten „Antiatomen“ durchgeführt, um mehr über die „Antiwelt“ herauszufinden [Hij02, A⁺02]. Dazu gehören unter anderem spektroskopische Untersuchungen aber auch Experimente zur Gravitation. Einzelheiten zur historischen Entwicklung der Erforschung der Antimaterie kann etwa in [Hij02, Mon01] nachgelesen werden.

In der ersten Aufgabe des Arbeitsblattes sollen die Schüler die wichtigsten Stationen der Entdeckung der Antimaterie bis heute noch einmal kurz skizzieren. Den Schülern soll damit ein kleiner Einblick in die neuere Geschichte der Physik gelingen. Weiterhin soll ihnen verdeutlicht werden, wieviel Zeit zwischen einer Idee und ihrer praktischen Ausführung liegen kann. Im Falle der Antimaterie sind zwischen der theoretischen Postulierung und der gezielten Herstellung von Antimaterie insgesamt 67 Jahre vergangen. Dies zeigt die hohen Schwierigkeiten, die zur Realisierung der dazu notwendigen Schritte überwunden werden mussten, die im Folgenden kurz erläutert werden sollen.

Um Antiteilchen zu Elektron, Proton oder Neutron herzustellen, werden sehr hohe Energien, wie sie etwa beim Urknall vor 4,5 Milliarden Jahren geherrscht haben, be-

nötigt. Die notwendige Energie hängt dabei nach Einsteins Formel $E = m \cdot c^2$ davon ab, welche Masse die Teilchen haben, die erzeugt werden sollen. Da bei der Erzeugung eines Teilchens stets das passende Antiteilchen entsteht, benötigt man zur Erzeugung eines Teilchen - Antiteilchen - Paares mindestens die doppelte Ruheenergie des Teilchens selbst. Zur Erzeugung eines Proton - Antiproton - Paares ist somit mindestens $2 \cdot 938 \text{ MeV} = 1,876 \text{ GeV}$ notwendig [Dem05]. In Teilchenbeschleunigern werden Primärteilchen, sogenannte Projektile, geeigneter Ruhemasse auf entsprechend hohe kinetische Energien beschleunigt, um dann beim Stoß Teilchen - Antiteilchenpaare und damit Antiteilchen zu erzeugen. Unter anderem am CERN werden dazu z.B. Protonen, die zuvor

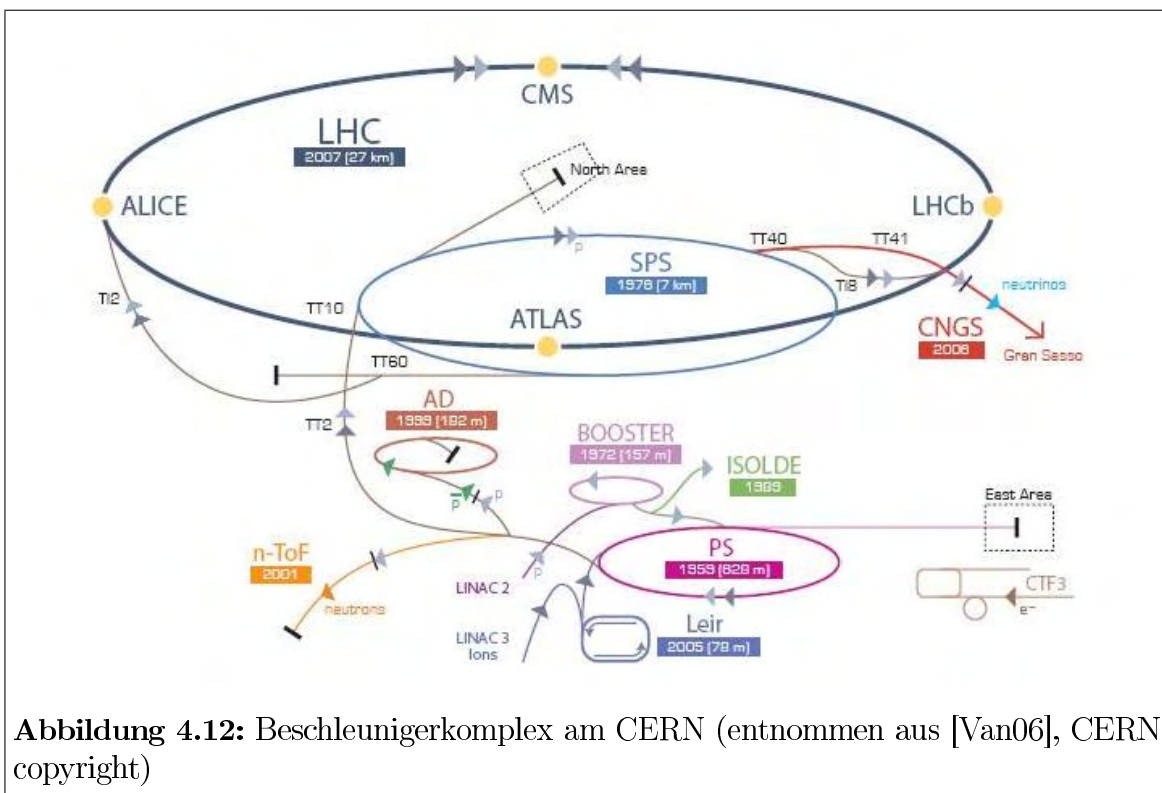
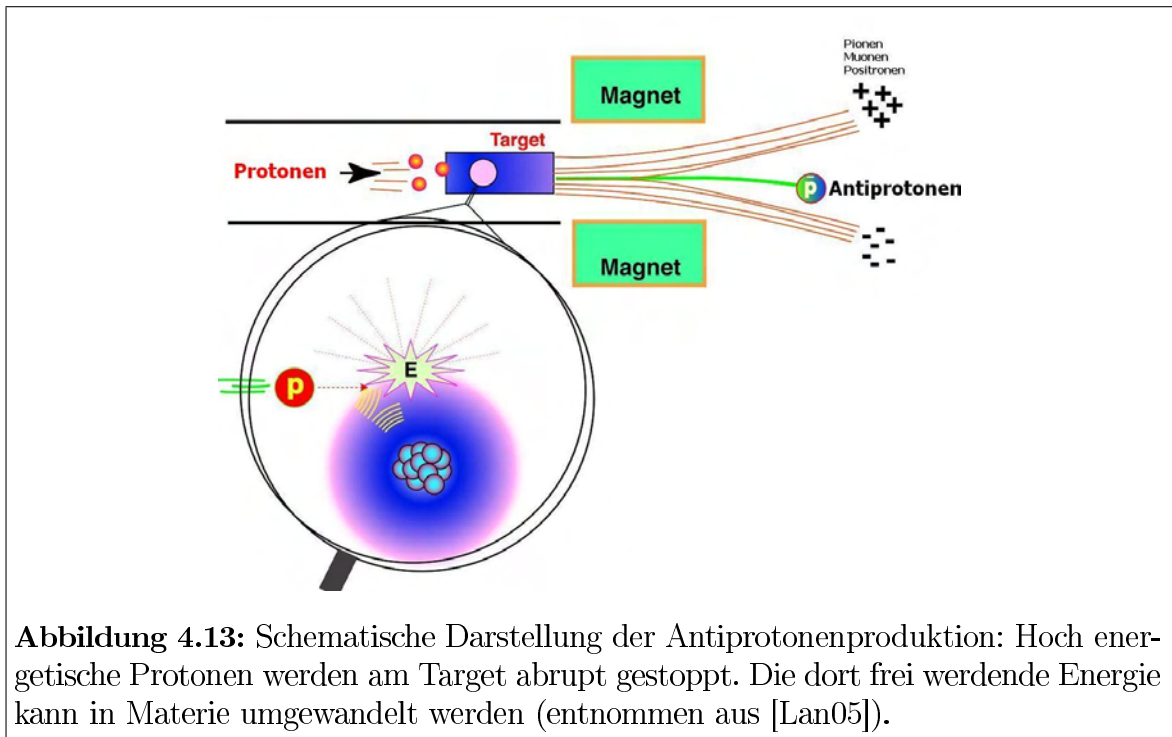


Abbildung 4.12: Beschleunigerkomplex am CERN (entnommen aus [Van06], CERN copyright)

durch Ionisation von Wasserstoff hergestellt werden, zunächst im sogenannten Linac2 (Linear Accelerator 2) vorbeschleunigt, bevor ihre Energie im Protonen Synchrotron (PS) weiter erhöht wird (vgl. Abb. A.0). Ist die Energie der Protonen hoch genug, lässt man sie schließlich auf ein sogenanntes Target aus Kupfer oder Iridium treffen. Dort werden die Protonen beim Stoß auf einen Atomkern abrupt gestoppt, wobei ihre komplette kinetische Energie auf einmal freigesetzt wird. Unter diesen extremen Umständen kann es zur Umwandlung von Energie in Materie kommen, d.h. es kann zum Beispiel ein neues Proton - Antiproton - Paar entstehen (vgl. Abb. A.0).

Da der Prozeß sehr unwahrscheinlich ist, müssen zur Erzeugung eines einzigen Proton - Antiproton - Paares im Schnitt 1 Million Protonen das Target treffen. Am CERN



werden daher 10 Trillionen ($= 10^{18}$) Protonen pro Tag erzeugt und auf das Target beschleunigt und es stehen insgesamt 10^{12} Antiprotonen pro Tag für weiterführende Experimente zur Verfügung [Man01, Lan05].

Die auf diese Weise erzeugten Antiprotonen bewegen sich zunächst nahezu mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass das gerade erzeugte Antiproton in Kontakt mit der umgebenden Materie kommt, was eine sofortige „Annihilation“ zur Folge hätte. Dabei „vernichtet“ sich das Antiteilchen mit einem entsprechenden Teilchen, wobei die Energie in Strahlung (Photonen) oder leichtere Teilchen - Antiteilchen - Paare umgesetzt wird. Damit aber die erzeugten Antiprotonen für Experimente verwendet werden können, müssen sie direkt nach ihrer Erzeugung in Teilchenfallen ohne Kontakt zu „normaler“ Materie gesammelt werden. Das bedeutet also, dass neben den hohen Energien, die man benötigt, um die Antiteilchen zu erzeugen, die Speicherung der Teilchen das größte Problem bei Experimenten mit Antiteilchen ist. Am CERN geschieht dies im Antiproton Decelerator (AD), wo die Antiprotonen nach der Erzeugung stufenweise gebremst werden, bevor sie in Fallen eingeschlossen und gespeichert werden.

Dan Brown beschreibt in seinem Buch „Illuminati“, dass dem CERN ein Gramm Antimaterie entwendet wird. Die Schüler können ein Gefühl dafür bekommen, wie hoch die Kosten und der Zeitaufwand sind, um eine Menge von einem Gramm Antimate-

rie herzustellen. Die dazu notwendigen Daten sind auf dem Arbeitsblatt aufgelistet; sie wurden [Lan05] entnommen. Als Lösung dieser Aufgabe erhalten die Schüler, dass man zur Herstellung von 1 g Antiprotonen bei dem momentanen Forschungsstand $1,64 \cdot 10^9$ Jahre benötigen würde und Kosten in Höhe von $4,32 \cdot 10^{16}$ Euro, d.h. etwa 10 Billionen Euro entstünden.

Dies bedeutet, dass die Nutzung von Antimaterie als Waffe zwar rein theoretisch denkbar ist, jedoch in den nächsten Jahrzehnten nicht ernsthaft zur Debatte steht. Auch kann bei Antimaterie nicht von einer 100 % effizienten Energiequelle gesprochen werden, da Antimaterie zunächst hergestellt werden muss und dazu etwa hundertmal mehr Energie notwendig ist, als bei der Annihilation von Teilchen und Antiteilchen frei wird [Lan06].

Ionenstrahlentherapie gegen Krebs

Teilchenbeschleuniger finden nicht nur in der Hochenergiephysik und damit in der Grundlagenforschung, sondern großteils (vergleiche dazu [Pol05], Kapitel 13) in Industrie oder Medizin ihre Anwendung. Aus diesem Grund behandelt das zweite den Schülern zur Auswahl stehende Arbeitsblatt eine medizinische Anwendung von Teilchenbeschleunigern - die Ionenstrahlentherapie gegen Krebs. Die Wahl ist hierbei auf eine Anwendung aus der Medizin gefallen, da man unter anderem in Untersuchungen in der Oberstufe festgestellt hat, dass das Interesse der Schüler gerade durch medizinische Kontexte im Physikunterricht deutlich gesteigert werden kann. Dies ist in [Ber00], [Wie03] und [Ber04] näher ausgeführt. Die Ionenstrahlentherapie gegen Krebs ist wegen der vergleichsweise großen Aktualität noch kaum in Standardschulbüchern zu finden. In diesem Projekt erhalten die Schüler dennoch die Möglichkeit, mehr über dieses hochaktuelle Anwendungsgebiet zu erfahren.

Das Arbeitsblatt ist in Form eines wissenschaftlichen Zeitungsartikels geschrieben und am Ende werden Fragen zum Textverständnis gestellt. Der Artikel beginnt mit einer kleinen Einführung, in der den Schülern verdeutlicht wird, aus welchem Grund neue Therapien zur Krebsbehandlung notwendig sind. Laut [GR01] erkranken in Deutschland jährlich etwa 350 000 Menschen an Krebs. Diese Menschen werden konventionell neben Chemotherapie mit elektromagnetischer Strahlung wie etwa Röntgenstrahlung, Gamma - Strahlung oder noch höherenergetischen Photonen behandelt. Diese heute verfügbaren Behandlungsmethoden versagen jedoch bei etwa einem Drittel der Patienten, deren Tumore bei der Erstdiagnose noch keine Fernabsiedlungen haben. In diesen Fällen sind andere, nichtkonventionelle Therapieformen dringend notwendig. Bei einem Teil dieser bislang noch nicht behandelbaren Tumoren verspricht der Einsatz von hochenergetischen Ionenstrahlen eine erhebliche Verbesserung der Behandlungserfolge. Dies zeigt sich unter anderem an der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) in

Darmstadt, wo seit 1997 etwa 60 Patienten pro Jahr auf diese Weise behandelt werden.

Die Therapie mit hochenergetischen Ionenstrahlen, die in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden, ist insofern vorteilhaft, dass gegenüber der konventionellen Bestrahlung die Energie nahezu vollständig innerhalb des kranken Gewebes und damit deutlich günstiger deponiert wird. Diese Tatsache ist in Abb. A.0 verdeutlicht, in welcher die relative Dosis, die proportional zur abgegebenen Energie ist, für verschiedene Bestrahlungsmethoden in Abhängigkeit der Wassertiefe aufgetragen ist. Da unser Gewebe hauptsächlich aus Wasser besteht, entspricht der Verlauf dieser Abbildung auch der Energieabgabe der Strahlen in menschlichem Gewebe.

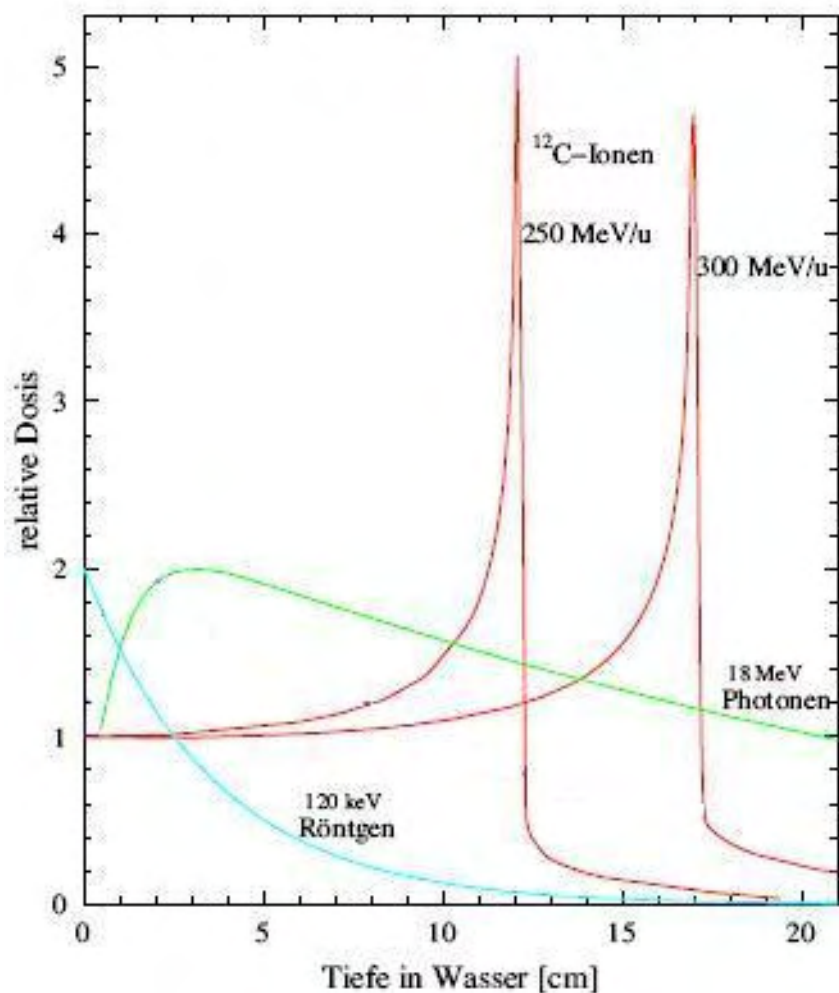


Abbildung 4.14: Relative Dosis, d.h. relativ zur Masse abgegebene Energie für verschiedene Bestrahlungsmethoden in Abhängigkeit der Wassertiefe (entnommen aus [Kra05])

Abbildung A.0 vergleicht die Dosisverteilung von hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung, also Röntgen - oder γ - Strahlung, mit derjenigen von Teilchenstrahlung mit Energie im Bereich von 250 MeV/u bzw. 300 MeV/u. Man erkennt deutlich, dass die relative Dosis von hochenergetischen Photonen bei geringer Tiefe zunächst ein Maximum hat und danach exponentiell abnimmt. Das Maximum der Bestrahlungsdosis liegt bei dieser Behandlungsart je nach Photonenenergie wenige Zentimeter unter der Haut, sodass bei tiefer liegenden Tumoren die Dosis vor dem Tumor wesentlich größer ist als im Zielvolumen selbst. Es wird also das gesunde Gewebe stark belastet, wohingegen die Dosis im Tumor eventuell noch zu gering ist. Um die Dosis im kranken Gewebe zu erhöhen, ohne das gesunde Gewebe nachhaltig zu schädigen, benutzt man die sogenannte Kreuzfeuer - Technik. Dazu wird der Tumor aus verschiedenen Richtungen bestrahlt. Jedoch steigt in diesem Fall nicht nur die Dosis im Tumor selbst sondern gleichzeitig auch die insgesamt verabreichte Dosis signifikant an. Diese integrale Dosis ist nun lediglich auf ein größeres Volumen des Patienten verteilt. Die Belastung des gesunden Gewebes ist bei dieser Kreuzfeuer - Technik also weiterhin hoch, wodurch etwa eine Tumorbehandlung im Bereich des Gehirns so gut wie unmöglich ist.

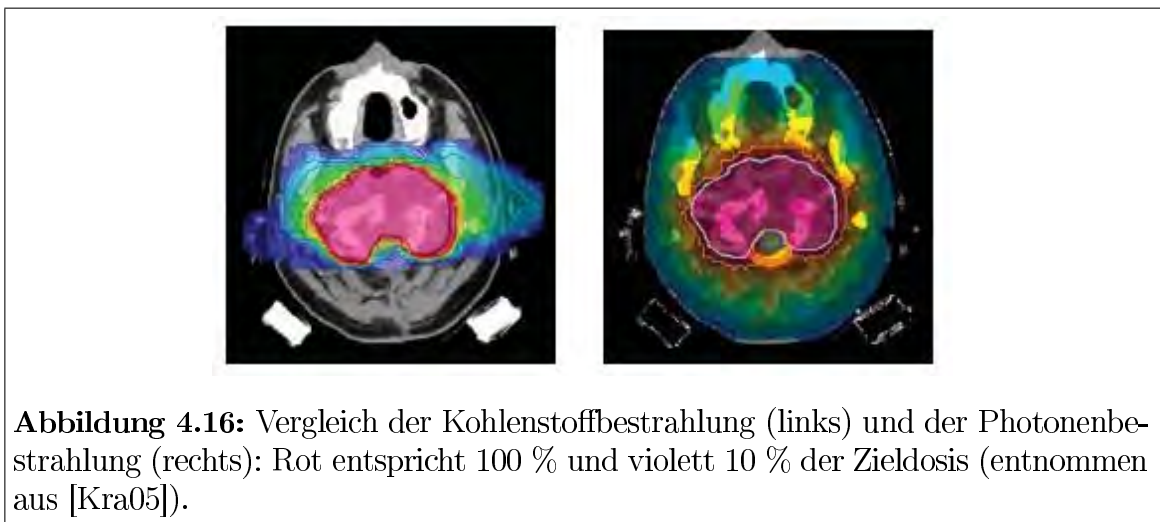


Abbildung 4.15: Patientenvorbereitung: Vor der Behandlung erhält der Patient eine Fixierungsmaske, die ihm keinerlei Bewegungsfreiheit gestattet (entnommen aus [Kra05]).

Eine günstigere Möglichkeit zur Behandlung von tieferliegenden Tumoren mit geringer Belastung des gesunden Gewebes, ist der Einsatz von hochenergetischen Ionenstrahlen. Gemäß Abb. A.0 steigt bei der Bestrahlung mit ^{12}C - Ionen die relative Dosis mit wachsender Eindringtiefe zunächst leicht an, erreicht ein hohes, wohl lokalisiertes Maximum und fällt danach steil ab. Dies liegt daran, dass die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit dem Gewebe mit kleinerer Geschwindigkeit, d.h. nach Abbremsung in größerer Eindringtiefe deutlich höher ist. Schülern kann man diesen Verlauf folgendermaßen anschaulich erklären: Die Ionen wechselwirken über ihre Ladung mit dem Gewebe und dies geschieht je nach Geschwindigkeit unterschiedlich stark. Die zu Beginn sehr schnellen Ionen passieren das Gewebe so schnell, dass sie kaum eine Chance

haben, mit den Atomen - sei es mit dem Atomkern oder der Hülle - zu wechselwirken. Dabei ist die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit des Ions mit der Atomhülle noch sehr viel höher als die mit dem Atomkern, da die Hülle einen sehr viel größeren Raum einnimmt. Kommt es zur Wechselwirkung zwischen Ion und Atomhülle, so regt das Ion das Atom entweder an oder ionisiert es. Dabei verliert es an kinetischer Energie und wird mit wachsender Eindringtiefe immer langsamer. Demnach kann das Ion in größerer Eindringtiefe länger mit den Elektronen des Gewebes wechselwirken. Dabei steigt die abgegebene Energie stark an und hat ihr Maximum am Ende der Teilchenbahn [Kra05].

Die am Ende der Bahn deponierte Energiemenge ist absolut gesehen sehr gering, da Teilchenbeschleuniger nur vergleichsweise niedrige Ionenstrahlströme im μA Bereich beschleunigen können. Der ionisierende Strahl schädigt das Gewebe daher nicht durch Temperaturerhöhung, sondern greift nahezu ausschließlich direkt an den chemischen Bindungen an und zerstört dabei die Tumorzellen und deren DNA. Bei dieser Methode ist das Verhältnis von unerwünschter Schädigung des gesunden Gewebes und erwünschter Schädigung im Tumor damit um ein Vielfaches günstiger als bei konventioneller Strahlung.



Diese Tatsache verdeutlicht auch Abb. A.0, in der links die hochenergetische Kohlenstoffbestrahlung und rechts die Photonenbestrahlung gezeigt sind. Die Farbskala in dieser Abbildung reicht von rot, entsprechend 100 % der Zieldosis, bis violett, mit 10 % der Zieldosis)

Die Eindringtiefe der Ionen hängt gemäß Abb. A.0 davon ab, mit welcher Energie die Teilchen auf das Gewebe treffen, d.h. welche Energie ihnen im Teilchenbeschleuniger zugeführt wurde. Während für die Bestrahlung von Augentumoren mit Protonen schon

eine Energie von 60 bis 90 MeV ausreicht, werden für tiefer liegende Tumore 160 bis 220 MeV verwendet [Wur03]. Um auch komplex geformte Tumore behandeln zu können, wurde am Forschungszentrum der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt das sogenannte Rasterscanverfahren entwickelt.

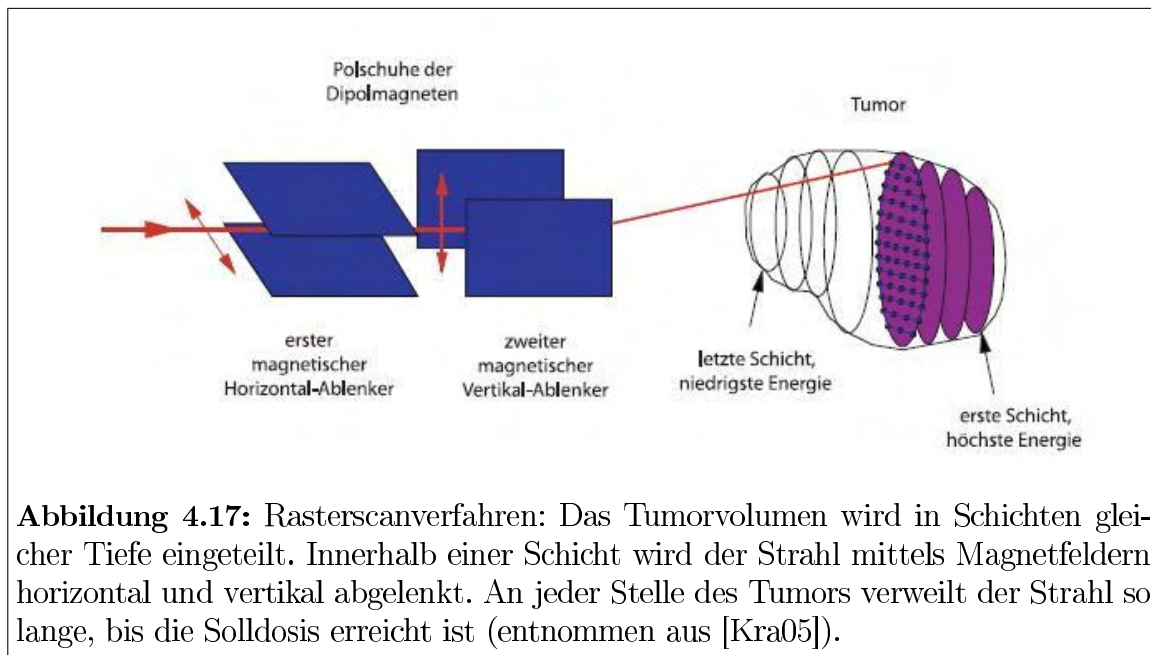


Abbildung 4.17: Rasterscanverfahren: Das Tumolvolumen wird in Schichten gleicher Tiefe eingeteilt. Innerhalb einer Schicht wird der Strahl mittels Magnetfeldern horizontal und vertikal abgelenkt. An jeder Stelle des Tumors verweilt der Strahl so lange, bis die Solldosis erreicht ist (entnommen aus [Kra05]).

Wie Abb. A.0 zeigt, wird dabei das Tumolvolumen, das zuvor mittels Kernspin - oder Computertomographie exakt lokalisiert wurde, zunächst in Schichten gleicher Tiefe eingeteilt. Innerhalb einer Schicht kann nun der Teilchenstrahl mittels Magnetfelder zweidimensional abgelenkt werden. Dabei verweilt der Strahl solange an einer Stelle, bis dort die berechnete Solldosis erreicht ist. Zweckmäßig beginnt man bei diesem Verfahren mit der am tiefsten liegenden Schicht und benötigt somit zu Beginn Teilchen mit großer Energie. Diese Teilchenenergie muss während der Behandlung im Teilchenbeschleuniger von Schicht zu Schicht auf immer kleinere Energien geregelt werden. Die Methode ermöglicht es, die Dosisverteilung in niemals zuvor erreichter Präzision an den Tumor anzupassen. Dazu ist es allerdings auch notwendig, das Zielvolumen, in diesem Fall den Patienten, exakt zu positionieren. Für den Patienten bedeutet dies, dass er sich und speziell den zu bestrahlenden Bereich wenn möglich überhaupt nicht bewegen darf. Um dies zu gewährleisten müssen die Patienten während der Bestrahlung von Gehirntumoren eine eigens angefertigte Fixierungs - Maske tragen, die keine Bewegungsfreiheit gestattet (vgl. Abb. A.0). Tumore im Kopfbereich und an der Wirbelsäule sind auf diese Weise relativ gut behandelbar. Tumore in Bauch - oder Brustraum dagegen, werden trotz äußerer Fixierung durch die Atmung und den Herzschlag bewegt, was eine Behandlung in diesen Bereichen mit der oben beschriebenen Methode behindert.

Zur Zeit wird daher an neuen Verfahren gearbeitet, die in Zukunft auch eine Ionenbestrahlung in diesen Bereichen ermöglichen sollen [Kra05].

Im Anschluss des wissenschaftlichen Artikels des ausgeteilten Arbeitsblattes kann mit entsprechenden Fragen die Kompetenz des Textverständnis der Schüler gefördert werden. In der ersten Aufgabe sollen die Schüler wiedergeben, welche Probleme sich bei der konventionellen Strahlentherapie ergeben und damit die Motivation für eine neue Behandlungsmethode gegen Krebs beschreiben. In der nächsten Frage sollen die Vorteile der neuen Behandlungsmethode mit Ionenstrahlen herausgearbeitet werden. Um schließlich anzudeuten, dass auch diese Behandlungsmethode nicht perfekt ist, sollen in einer letzten Frage die Schwierigkeiten bzw. die Grenzen der Ionenstrahlenbehandlung beschrieben werden. Diese können zum Teil dem Text entnommen werden oder auch selbst in angeleiteter Diskussion gefunden werden.

4.3 Eindrücke der Schüler

Die in Kap. 4.2 beschriebenen Projektbausteine wurden im November 2006 testweise in einem Schülerprojekt mit einem 12er Physik - Leistungskurs des Willigis Gymnasiums in Mainz durchgeführt. Bei dem Kurs handelte es sich um eine reine Jungengruppe mit 12 Schülern und das Projekt wurde gemäß Tab. 4.1 eintägig an der Universität Mainz durchgeführt.

Auffällig bei dieser Gruppe war, dass die Schüler während dem Vortrag seitens des Betreuers noch relativ zurückhaltend waren und keine Fragen zu dem Vortrag oder darüber hinaus stellten. Dies ist entweder auf die für sie ungewohnte Atmosphäre an der Universität oder auf die in der Schule gewohnte passive Haltung während dem Unterricht zurückzuführen. Aber schon beim Vorführen der Paulfallen für makroskopische Teilchen im dem Einführungsvortrag löste sich diese anfängliche Anspannung und die Schüler wagten sich auch weiterführende Fragen etwa über Paulfallen in der Forschung zu stellen.

Eine endgültig entspannte Atmosphäre herrschte schließlich beim Bau der Paulfallen. Dort konnte man den Großteil der Schüler mit großem Eifer und Begeisterung beim Löten und Zusammenbauen der Einzelteile der Falle beobachten. Vereinzelt wurden jedoch beim Umgang mit Schraubenzieher und Lötkolben gewisse Defizite handwerklicher Fähigkeiten deutlich, die auf fehlende Schulung dieser Fähigkeiten schließen lassen. Beim Testen der Falle entwickelte sich schließlich sogar ein kleiner Konkurrenzkampf darum, wer die meisten Bärlappsporen in seiner selbst gebauten Falle speichern kann - die Begeisterung für das Modell war an dieser Stelle somit vollständig geweckt.

Diese Begeisterung setzte sich auch beim Experimentieren mit den entwickelten Teil-

chenbeschleunigermodellen fort. Fast alle Schüler zückten ihre Kameras bzw. Handys, um den Beschleunigungsprozess der Bärlappsporen photographisch festzuhalten. Die Schüler versuchten unermüdlich, die Teilchen auf immer höhere Geschwindigkeiten zu bringen. Dabei fielen auch Aussagen wie: „Solch einen Teichenbeschleuniger hätte ich auch gerne zu Hause!“ und „Damit könnte ich mich den ganzen Tag beschäftigen!“, was deren Faszination für die Modelle und dabei auch die damit verbundene Physik deutlich widerspiegelt.

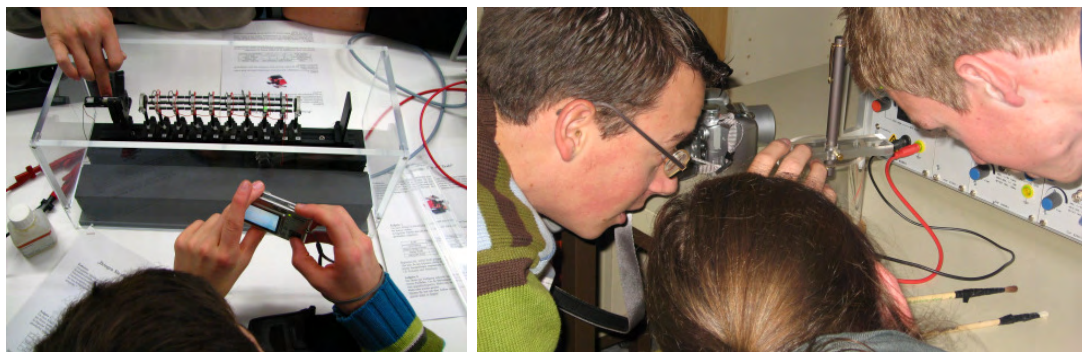


Abbildung 4.18: Die Schüler waren von den Modellen so fasziniert, dass sie ihre Beobachtungen sogar mit ihren eigenen Kameras festgehalten haben.

Nach Abschluss des Praktikums gab es eine Diskussionsrunde mit der ganzen Gruppe, in der alle Schüler ihre Eindrücke und Verbesserungsvorschläge zum Projekttag äußern sollten. In dieser Abschlussdiskussion stießen die praktischen Aspekte beim eigenen Fallenbauen und die experimentellen Aspekte beim Umgang mit den Teilchenbeschleunigermodellen auf besonders positive Resonanz. Geradezu beeindruckt waren die Schüler auch von den einfachen Mitteln, die zum Bau der eigenen Paulfalle benötigt wurden. Gerade auf diesen Aspekt der eigenen handwerklichen Tätigkeit wurde im Vorfeld der Planung des Schülerpraktikums besonders großen Wert gelegt, da diese - sowohl aus Zeit als auch aus Material - und Kostengründen, gerade im Schulunterricht an Gymnasien oft zu kurz kommen.

In der Abschlussrunde wurde allerdings auch deutlich, dass die Schüler den Teil des Praktikums, in dem eine eigene Präsentation z.B. mit Power - Point vorbereitet und vorgetragen wurde, als nicht unbedingt notwendig empfanden. Sie waren zwar sehr an den interessanten und aktuellen Anwendungen von Teilchenbeschleunigern - der Antimaterieerzeugung und -speicherung und der Ionenstrahlentherapie gegen Krebs - interessiert, jedoch wäre ihnen eine kurze Erläuterung in einem Vortrag seitens des Betreuers statt der aufwändigen Arbeit der Vorbereitung eines eigenen Vortrages lieber gewesen. Allerdings spielt die Präsentationskompetenz eines jeden gerade im späteren Studium und / oder Beruf eine große Rolle und aus diesem Grund ist es wichtig diese in

allen Schulfächern zu fördern. Zudem führt das Vorbereiten und Vortragen eines Themas zu einem tieferen Verständnis der Zusammenhänge und ist durch einen Vortrag seitens des Betreuers keinesfalls zu ersetzen. Aus diesen soeben genannten Gründen, sollte auch in Zukunft auf diesen Praktikumsteil nicht verzichtet werden.

Bei der Gruppeneinteilung zu den verschiedenen Anwendungen fiel zudem auf, dass sich der größte Teil des Kurses eher für die Anwendung „Antimaterie“ interessierte, und sich kaum einer für die „Ionenstrahlentherapie gegen Krebs“ begeistern wollte. Ein Grund hierfür könnte der höhere Bekanntheitsgrad von Antimaterie durch Bücher wie „Illuminati“ oder durch Science - Fiction - Filme sein. Da es sich allerdings bei den Teilnehmern des besagten Testkurses ausschließlich um Jungen handelte, wäre es interessant, dieses Praktikum mit einer gemischten Gruppe von Jungen und Mädchen erneut durchzuführen, um zu beobachten, ob es gegebenenfalls eine andere Einstellung bei Mädchen gegenüber der medizinischen Anwendung gibt. Hiermit wäre die in vielen physikdidaktischen Zeitungsartikeln enthaltene Aussage, dass medizinische Kontexte im Physikunterricht den Neigungen der Mädchen besonders entgegenkommen, bestätigt [Ber04].

Die insgesamt positive Resonanz zu dem durchgeführten Projekt, die in dieser Abschlussrunde deutlich wurde, konnte bislang schon bei einer weiteren Schülergruppe im Januar 2007 vernommen werden. Dieser 12er Leistungskurs Physik der Carl - von - Ossietzky - Schule in Wiesbaden nahm an dem von der Arbeitsgruppe Larissa an der Universität Mainz schon häufig angebotenen einwöchigen Praktikum teil, in dem verschiedene moderne Experimente mit Schülern durchgeführt werden können. Da es sich bei diesem Kurs um einen gemischten Kurs handelte, konnte hier auch die Einstellung der Mädchen gegenüber der medizinischen Anwendung beobachtet werden. Dabei fiel auf, dass sich tatsächlich alle Mädchen dieses Kurses bei der Auswahl zwischen „Antimaterie“ und „Ionenstrahlentherapie gegen Krebs“ für die medizinische Anwendung der Ionenstrahlentherapie entschieden. Dies bestätigt somit in gewisser Weise die Aussagen in vielen physikdidaktischen Zeitschriften, nach der medizinische Kontexte im Unterricht besonders für Mädchen interessefördernd wirken. Auch bei dieser Gruppe wurde der praktische Aspekt beim Fallenaufbau und das selbstständige Experimentieren mit den Teilchenbeschleunigermodellen besonders hervorgehoben und gelobt. Der betreuende Lehrer dieses Kurses war von diesem Praktikum sogar so begeistert, dass er schon weitere Schüleraktivitäten in der Arbeitsgruppe LARISSA ins Auge gefasst hat.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorgestellten Projekt werden exemplarisch zwei wichtige und heute unverzichtbare Handwerkszeuge der modernen Atomphysik des 20ten Jahrhunderts - der Teilchenbeschleuniger und die Paulfalle - schülergerecht aufbereitet und durch Experimente und Anwendungen faszinierend und lebendig dargestellt. Die Schüler lernen, wie man geladene Teilchen in elektrischen Wechselfeldern einer Paulfalle speichern kann und bauen selbst eigene, einfache Fallen auf. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusätzlich auf den bestehenden Modellen aufbauend, ein einfaches Teilchenbeschleunigermodell entwickelt.

Als Teilchenbeschleunigermodell wurde dabei bewusst ein überschaubarer Aufbau ausgewählt, mit dem makroskopische Teilchen, wie beispielsweise Bärlappsporen oder Kakao über elektrische Felder verschoben und damit beschleunigt werden können. Vorteilhaft an diesen makroskopischen Teilchen ist, dass sie mithilfe eines Lasers gut sichtbar gemacht werden können und das Verhalten der Teilchen im elektrischen Feld direkt mit eigenen Augen beobachtet werden kann. Dies ist in den realen Beschleunigeranlagen üblicherweise nicht möglich. Die Schüler können an dem im Projekt verwendeten, überschaubaren Aufbau selbstständig experimentieren und sich auf diese Weise das Prinzip der Teilchenbeschleunigung anschaulich erschließen. Sie lernen, dass die Beschleunigung auf zeitlich variierenden elektrischen Potentialen beruht.

In dem in dieser Arbeit beschriebenen Schülerprojekt lag der Schwerpunkt auf den Grundprinzipien von Teilchenbeschleuniger und Paulfalle. Beobachtet man jedoch die Bewegung der Teilchen in beiden Modellen, so fällt auf, dass auch etwa die Mikrobewegung der Teilchen in den selbstgebaute Paulfallen sehr eindrucksvoll beobachtet werden kann (vgl. Abb. 5.1). Die Teilchen bewegen sich mit einer Frequenz von 50 Hz entlang der Feldlinien, so dass sie als kleine rote Striche innerhalb der Falle zu sehen sind.

In Kap. 2.2.3 wurde jedoch gezeigt, dass die Bewegung der Teilchen in einer Paulfalle im Allgemeinen eine Überlagerung aus Mikro - und Makrobewegung ist. In den selbstgebaute Paulfallen im Schülerprojekt kann die erwartete langsame Teilchenoszillation der Makrobewegung jedoch nicht beobachtet werden. Die Ursache dafür ist in der großen Dämpfung der Teilchenbewegung in der Luft zu finden [WO91]. Betrachtet man nun die Teilchenbahnen im Beschleunigermodell, so stellt man fest, dass auch hier die meisten Teilchen wie erwartet eine schnelle Oszillation mit angelegter Frequenz ausführen. Jedoch sind die Bahnen einzelner Teilchen deutlich komplizierter und



Abbildung 5.1: Teilchenbewegung in der selbstgebauten Paulfalle

verlaufen entlang eines Drei - oder Vierecks (vgl. Abb. 5.2). Warum in diesem Modell unter weitgehend gleichen Bedingungen eine deutlich komplexere Teilchenbahn beobachtet werden kann, ist bisher noch nicht zufriedenstellend beantwortet. Mit dieser oder ähnlichen Fragenstellungen zur Teilchenbewegung in Paulfallen könnte man sich in einer noch folgenden Staatsexamensarbeit näher beschäftigen.

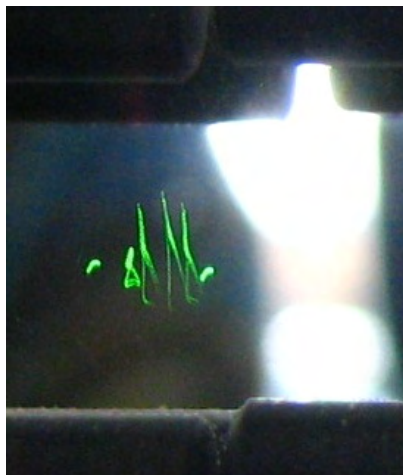


Abbildung 5.2: Teilchenbewegung im Teilchenbeschleunigermodell

Eine bedeutsame Erweiterung, mit der das bestehende Schülerprojekt zusätzlich bereichert werden könnte, ist im Bereich des Teilchenbeschleunigermodells denkbar. Bei dem aufgebauten Modell handelt es sich um einen linearen Teilchenbeschleuniger. In der Forschung wird die Dimension solcher linearer Beschleunigungseinrichtungen bei hohen Teilchenenergien schnell sehr groß, was den Platzbedarf und die Kosten stark

erhöht. Dieses Problem wird in sogenannten Kreisbeschleunigern, zu denen etwa das Zyklotron zählt, umgangen. In diesen Beschleunigeranlagen wird dieselbe Beschleunigerstruktur mehrfach genutzt, was sowohl den Platz als auch die Kosten stark reduziert. Um mit den Schülern auch diese Problematik zu diskutieren, könnte in einer nächsten Staatsexamensarbeit versucht werden, ein Modell für einen solchen Kreisbeschleuniger zu entwickeln, mit dem erneut selbstständig experimentiert werden kann.

Solange jedoch dieses Fernziel eines Kreisbeschleunigers für makroskopische Teilchen noch nicht realisiert ist, wird das bestehende Projekt aufgrund der vornehmlich positiven Resonanz, weiterhin durchgeführt werden. Schon im kommenden Monat sind bereits zwei weitere Schülerprojekte mit Teilchenbeschleuniger und Paulfalle geplant. Bis dahin wird auch das Teilchenbeschleunigermodell mit länger werdenden Segmentstäben fertig aufgebaut und getestet sein, so dass auch dieses dann zum Einsatz kommen wird.

Literaturverzeichnis

- [A⁺02] M. AMORETTI ET AL. *Production and detection of cold antihydrogen atoms*. Nature, Band 419(10):456–459, Oktober 2002.
- [A⁺03] G. ARNETH ET AL. *Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht*. <http://nibis.ni.schule.de/nli1/bbs/archiv/rahmenrichtlinien/kmksiu.pdf>, 2003.
- [Ber00] R. BERGER. *Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik, ein Weg zu interessantem Physikunterricht*. Logos, Berlin, 2000.
- [Ber04] O. E. BERGE. *Medizin für den Physikunterricht - Interesse und naturwissenschaftliche Grundbildung durch medizinische Themen fördern*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 4:4–7, August 2004.
- [BFB02] O. BOINE-FRANKENHEIM UND K. BLASCHE. *Physik und Technik der Ionenbeschleunigung*. <http://www-linux.gsi.de/boine/vorlesung.html>, 2002.
- [Bla00] K. BLAUM. *Resonante Laserionisations-Massenspektrometrie an Gadolinium zur Isotopenhäufigkeitsanalyse mit geringsten Mengen*. Dissertation, Universität Mainz, 2000.
- [Bro03] D. BROWN. *Illuminat*. Bastei Lübbe, Bergisch Gladbach, 2003.
- [Dem98] W. DEMTRÖDER. *Kern- Teilchen- und Astrophysik*. Springer, Berlin, 1998.
- [Dem04] W. DEMTRÖDER. *Elektrizität und Optik*. Springer, Berlin, 2004.
- [Dem05] W. DEMTRÖDER. *Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, Heidelberg, 2005.
- [DF03] B. DÖRLING UND P. FRITZ. *Staub im Käfig - Das Modell einer Paulfalle*. <http://www.quantenphysik-schule.de/Dokumente/jufopaul.pdf>, 2003.
- [Eng04] K. ENGELN. *Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken*. Logos, Berlin, 2004.
- [Eul05] M. EULER. *Schülerinnen und Schüler als Forscher: Informelles Lernen im Schülerlabor*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik, Band 6:4–12, 2005.

- [Geh92] D. GEHRLICH. *Inhomogeneous rf fields: a versatile tool for the study of processes with slow ions*. Adv. Chem. Phys., Band 82:1–178, 1992.
- [Gho95] K. GHOSH. *Ion Traps*. Oxford University Press, Oxford, 1995.
- [GOW06] D. GRZONKA, W. OELERT UND J. WALZ. *Experimente mit der „Antiwelt“*. Physik Journal, Band 5(3):37–43, März 2006.
- [GR01] K. GROSS UND J. REISS. *Krebstherapie mit Ionenstrahlen*. GSI Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, 2001.
- [Gri01] R. GRIMM. *Kristalliner Ionenstrahl im Mini-Speicherring*. Physikalische Blätter, Band 10:16–17, 2001.
- [Gue06] S. B. GUEYE. *Electron - Radio - Frequency Quadrupole Linear Accelerator: Theory, Design and Measurements for the GHz region*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Mai 2006.
- [Hij02] T. W. HIJMAN. *Cold antihydrogen*. Nature, Band 419(10):439–440, Oktober 2002.
- [Kra05] G. KRAFT. *Tumorthherapie mit schweren Ionen: Physikalische und biologische Grundlagen, Technische Realisierung an der GSI, Klinische Ergebnisse*. Verein zur Förderung der Tumorthherapie mit schweren Ionen e.V., Darmstadt, 2005.
- [Lan05] R. LANDUA. *Einstein und die „Illuminati“: Antimaterie im Praxistest*. <http://lbs.hh.schule.de/nwz/ph/aktuelles/einsteinjahr.html>, 2005.
- [Lan06] R. LANDUA. *Angels and Demons*. <http://cern.de/>, 2006.
- [Man01] D. MANGLUNKI. *The Antimatter Factory*. <http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/factory/AM-factory00.html>, 2001.
- [Max03] MAXLAB. *Entwicklung der Beschleuniger*. <http://www.maxlab.lu.se/acc-phys/teach/mnx301/2003/Klaus%20Wille/Historie.pdf>, 2003.
- [MGW05] F. MAJOR, V. GHEORGHE UND G. WERTH. *Charged particle traps*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [Mon01] R. MONDARDINI. *The History of Antimatter*. <http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/history/AM-history00.html>, 2001.
- [Pau90] W. PAUL. *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*. Phys. Bl., Band 46, 1990.

- [Pol05] K. POLJANC. *Unterlagen zur Spezialvorlesung Teilchenbeschleuniger*. <http://www.ati.ac.at/~amedphys/>, 2005.
- [PR55] W. PAUL UND M. RAETHER. *Das elektrische Massenfilter*. Zeitschrift für Physik, Band 140:262–273, 1955.
- [PRvZ58] W. PAUL, H. REINHARD UND U. VON ZAHN. *Das elektrische Massenfilter als Massenspektrometer und Isotopentrenner*. Z. Phys., Band 152:143–182, 1958.
- [Sch00] R. SCHARF. *Physik: Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung*. Deutsche Physikalische Gesellschaft, Bonn, 2000.
- [Sch01] A. SCHMITT. *Die Paulfalle als Schulerperiment - Eine Einführung in die Atomphysik*. Pädagogische Prüfungsarbeit zum zweiten Staatsexamen, Lessing - Gymnasium Lampertheim, 2001.
- [Sch02] A. SCHMITT. *Schüler und Schülerinnen als Fallenbauer*. Praxis der Naturwissenschaften, Band 2, 2002.
- [Sch03] U. SCHRAMM. *PALLAS - the PAuL Laser cooling Acceleration System*. http://www.ha.physik.uni-muenchen.de/uschramm/pallas/pallas_frame.html, 2003.
- [SSH01a] U. SCHRAMM, T. SCHÄTZ UND D. HABS. *Laser-cooling of Ions and Ion Acceleration in the RF-Quadrupole Ring Trap PALLAS*. http://www.ha.physik.uni-muenchen.de/uschramm/pallas/pallas_frame.html, 2001.
- [SSH01b] T. SCHÄTZ, U. SCHRAMM UND D. HABS. *Cristalline ion beams*. Nature, Band 412:717–720, 2001.
- [SWC81] R. STOKES, T. WANGLER UND K. CRANDALL. *The Radio - Frequency Quadrupole - A New Linear Accelerator*. IEEE Transactions on Nuclear Science, Band 28:1999–2003, 1981.
- [Van06] C. VANOLI. *CERN-DI-0606052*. <http://cdsweb.cern.ch/record/979035>, 2006.
- [Wie03] H. WIESNER. *Physik und Medizin - Steigerung des Interesses am Physikunterricht*. <http://www.physik.uni-r.de/didaktik/>, 2003.
- [Wil96] K. WILLE. *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*. Teubner, Stuttgart, 1996.

- [WO91] H. WINTER UND H. ORTJOHANN. *Simple demonstration of storing macroscopic particles in a „Paul trap“*. Am. J. Phys., Band 59:807–8013, 1991.
- [Wol87] H. WOLLNIK. *Optics of charged particles*. Akad. Pr., Orlando, 1987.
- [Wur03] K. WURZBACHER. *Forschungsreaktor FRM II: Krebsbehandlung mit Neutronen fragwürdig - Andere Strahlenarten wirken effektiver und schonender*. Umweltinstitut München, Verein zur Erforschung und Verminderung der Umweltbelastung e. V., München, 2003.

A Anhang

A.1 Arbeitsblätter

Arbeitsplan zum Bau einer Paulfalle

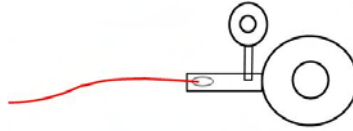


Benötigte Materialien:

- 2 Kappenelektroden
- 1 Ringelektrode
- 3 kleine Lötösen
- Bananenkabel (1x rot lang ($\approx 0,45\text{m}$), 1x schwarz lang, 2x schwarz kurz ($\approx 0,1\text{m}$))
- 2 Stecker für Bananenkabel (1x rot, 1x schwarz)
- 1 Widerstand ($1\text{ M}\Omega$)
- 1 lange Schraube aus Nylon
- 7 Muttern aus Nylon
- 1 Lüsterklemme
- 2 Holzteller
- 3 Abstandshalter aus Holz
- 1 Plexiglaszylinder
- 1 Laserhalter, incl. kleiner Schraube
- 1 Laserpointer

Arbeitsschritte:

- Ring - und Kappenelektroden an jeweils eine kleine Lötöse löten!



Achtung! Die Richtung der kleinen Lötöse muss so gewählt werden, dass die Wölbungen der Kappenelektroden in Richtung Ringelektrode zeigen und die Löcher alle untereinander liegen.

- An jede Elektrode ein Stück Kabel löten! (Rotes Kabel an Ringelektrode; jeweils ein kurzes schwarzes Kabel an Kappenelektroden)
- Elektroden auf die große Nygonschraube stecken und mit Hilfe der Nylonmuttern fixieren!
Achtung! Der Abstand beträgt jeweils zwei Muttern; die Ringe sollten parallel sein und die Löcher müssen untereinander liegen.

- Boden der Falle vorbereiten:
 - In einen der Holzteller Löcher bohren (M6 für die Nygonschraube und M3 für die Kabel).
 - Achtung!** Bohren Sie die Löcher so, dass die Elektroden nachher ungefähr in der Mitte des Holztellers sind.
 - Für den zweiten Holzteller Abstandhalter aus Holzleisten sägen und aufkleben, dabei zukünftige Position der Nygonschraube und der Kabel bedenken.
- Die Falle auf dem oberen Holzteller mit einer Mutter befestigen!
- Die Kabel durch die Löcher im Holzteller führen!
- Die beiden kurzen schwarzen Kabel in der Lüsterklemme zusammenführen und mit dem langen schwarzen Kabel verbinden!
- Unteren und oberen Holzteller zusammen kleben (vorher die Lötkontakte kontrollieren lassen)!
- Den Widerstand mit dem Wechselspannungskabel verbinden und das Kabel zusammen mit dem Widerstand mit dem Stecker versehen!
- Testen Sie den Aufbau (unter Aufsicht des Assistenten)!

„Bringen Sie die Teilchen auf Trab!“

Definiton:

„Um geladene Teilchen (z.B. Elementarteilchen, Atomkerne oder ionisierte Atome, Moleküle und Molekülbruchstücke) auf Trab zu bringen, d.h. sie zu beschleunigen, benutzt man sogenannte Teilchenbeschleuniger. Je nach Teilchenart und Beschleunigertyp können in diesem Gerät Geschwindigkeiten bis nahe der Lichtgeschwindigkeit erreicht werden. Die Teilchen erlangen dabei eine Bewegungsenergie (kinetische Energie), die einem Vielfachen ihrer eigenen Ruhemasse entspricht.“



(entnommen aus www.comicstore24.de/images/products/03132.jpg)

Aufgabe 1

Um einen Körper zu beschleunigen, muss nach dem 2. Newtonschen Gesetz eine Kraft auf diesen Körper wirken.

In folgender Tabelle sind alle Kräfte, die in der Natur vorkommen samt ihren wichtigsten Eigenschaften aufgelistet:

Kraft	relative Stärke	Reichweite [m]	betroffene Teilchen
Gravitation	$6 \cdot 10^{-39}$	∞	alle Teilchen
Elektromagnetismus	$\frac{1}{137}$	∞	geladene Teilchen
starke Kraft	≈ 1	$10^{-15} - 10^{-16}$	Hadronen
schwache Kraft	10^{-5}	$\ll 10^{-16}$	Hadronen und Leptonen

Begründen Sie, welche Kraft geeignet ist, um geladene Teilchen zu beschleunigen!

(Zur Info: Zu den Leptonen zählen die geladenen Elektronen, die Muonen und die Taus mit den jeweils dazugehörigen ungeladenen Neutrinos; Hadronen sind aus Quarks zusammengesetzt (z.B. Protonen oder Neutronen))

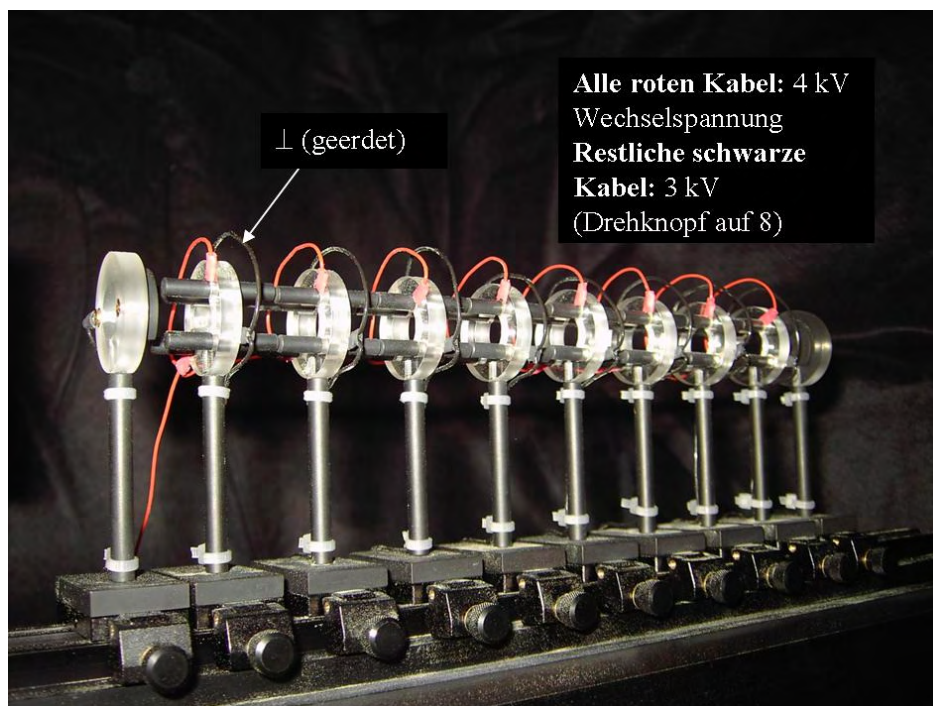
Aufgabe 2

Der Ihnen zur Verfügung stehende Aufbau besteht aus mehreren hintereinander gereihten linearen Paulfallen. Um die Bärlappsporen in den einzelnen linearen Fallen zu speichern, wird an zwei gegenüberliegenden Elektroden eine Wechselspannung angelegt und die anderen beiden Elektroden werden geerdet.

Machen Sie sich mit dem Aufbau vertraut und versuchen Sie die Bärlappsporen entlang der ganzen Achse zu speichern!

Aufgabe 3

Was wird passieren, wenn die Segmente wie folgt beschaltet sind? Wo werden sich die Teilchen bevorzugt aufhalten und wo nicht?



Testen Sie dies auch am Aufbau!

Aufgabe 4

Beschalten Sie den Aufbau wie in Aufgabe 3 und beladen Sie das erste Segment mit Bärlappsporen.

Versuchen Sie dann die Teilchen von diesem ersten Segment in das benachbarte Segment zu bewegen! Schieben Sie auf diese Weise die Teilchen bis zum letzten Segment und beschreiben Sie Ihre Vorgehensweise!

Aufgabe 5

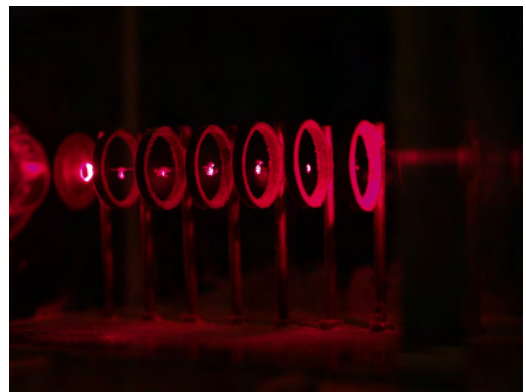
Können Sie auf diese Weise die Bärlappsporen auf höhere Geschwindigkeiten bringen und sie somit beschleunigen? Testen Sie dies und begründen Sie Ihre Antwort!

Aufgabe 6

- a) Angenommen, die Methode aus Aufgabe 4 funktioniert und die Teilchen werden von Segment zu Segment immer schneller. Welche Konsequenzen wird die höhere Geschwindigkeit der Teilchen auf Ihre Umschaltfrequenz haben?
- b) Aus technischen Gründen ist es am einfachsten, wenn die Frequenz des Umschaltens den ganzen Beschleunigungsprozess über konstant bleibt. Welche Auswirkungen hat dies auf den Aufbau?

Zusatzaufgabe

Statt mehreren linearen Fallen haben Sie nun hintereinander gereihte punktsymmetrische Fallen, wie folgende Abbildung zeigt:



- a) Wie müssen hier die einzelnen Segmente beschaltet sein, damit die Teilchen wie in der Abbildung gespeichert werden können?
- b) Liefße sich hiermit auch ein Beschleuniger realisieren? Begründen Sie!

Zur Info

Der größte Elektronenbeschleuniger steht heute beim Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in Kalifornien. Auf einer Strecke von 3 km werden dort die Elektronen auf Energien um 50 GeV ($= 50 \cdot 10^9$ eV) gebracht!



„1 Gramm Antimaterie, bitte!“

„Antimaterie ist die größte bekannte Energiequelle. Die Reaktion von Antimaterie führt zu einer vollständigen Freisetzung sämtlicher enthaltenen Energie (Wirkungsgrad: 100 %. Kerspaltung: 1,5 %). Antimaterie erzeugt weder Umweltverschmutzung noch Strahlung, und ein winziger Tropfen würde reichen, um New York einen ganzen Tag lang mit Energie zu versorgen.“ (Dan Brown: Illuminati)



In dem Buch „Illuminati“ von Dan Brown entwendet ein Geheimbund von Wissenschaftlern und Freidenkern, die sogenannten „Illuminati“, 1 Gramm Antimaterie aus einem Labor des CERN. CERN ist eine Abkürzung für **C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire und es handelt sich um die größte europäische Forschungseinrichtung für Kern- und Elementarteilchenphysik in Genf. Die entwendete und in Teilchenfallen gespeicherte Antimaterie soll dazu verwendet werden, den gesamten Vatikan zu sprengen und sich somit an dem „alten Feind“ der Wissenschaft zu rächen.

Was aber versteht man unter Antimaterie, gibt es sie überhaupt und ist sie tatsächlich als Energiequelle bzw. als Waffe zu verwenden?

JA, es gibt Antimaterie! Die Existenz von Antimaterie wurde bereits 1928 von Paul Dirac theoretisch vorhergesagt und Carl Anderson gelang es 1932 das Antiteilchen des Elektrons, das sogenannte Positron, in einer Nebelkammer nachzuweisen. In dieser Nebelkammer beobachtete er ein Teilchen, das sich im Magnetfeld wie ein Teilchen mit positiver Ladung und gleicher Masse wie ein Elektron verhielt (vgl. Abbildung 1). Nach längeren Untersuchungen an diesem zunächst dubiosen Teilchen war sich Anderson schließlich sicher, dass es sich um das Antiteilchen des Elektrons handelte.

Wenige Jahre später - 1955 und 1959 - gelang es Wissenschaftlern schließlich auch das Antiproton und das Antineutron zu entdecken. So wie Elektron, Proton und Neutron die Grundbausteine unserer Wirklichkeit sind, so sind die entsprechenden Antiteilchen die Grundbausteine der Antimaterie in der sogenannten Spiegelwelt der Wirklichkeit. 1959 waren diese Grundbausteine der „Antiwelt“ also alle nachgewiesen. Die gezielte Herstellung von Antiwasserstoffatomen aus Antiproton und Antielektron gelang allerdings erst 1995. Bis heute werden unter anderem am CERN (schematischer Aufbau siehe Abbildung 2) Experimente mit diesen einfachsten „Antiatomen“ durchgeführt,

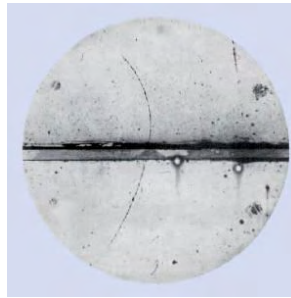


Abbildung 1: Nebelkammer

um mehr über die „Antiwelt“ herauszufinden.

Was aber sind Antiteilchen bzw. Antimaterie? Wie schon oben erwähnt, hat ein Antiteilchen genau die gleiche Masse wie ein Teilchen selbst. Auch andere Eigenschaften - wie etwa die Lebensdauer von Antiteilchen und Teilchen sind gleich. Der grundlegende Unterschied besteht allerdings in den umgekehrten Vorzeichen der beiden Teilchen. Das Antiproton beispielsweise hat die gleiche Masse und Lebensdauer wie das Proton selbst, ist aber im Gegensatz zu diesem negativ geladen.

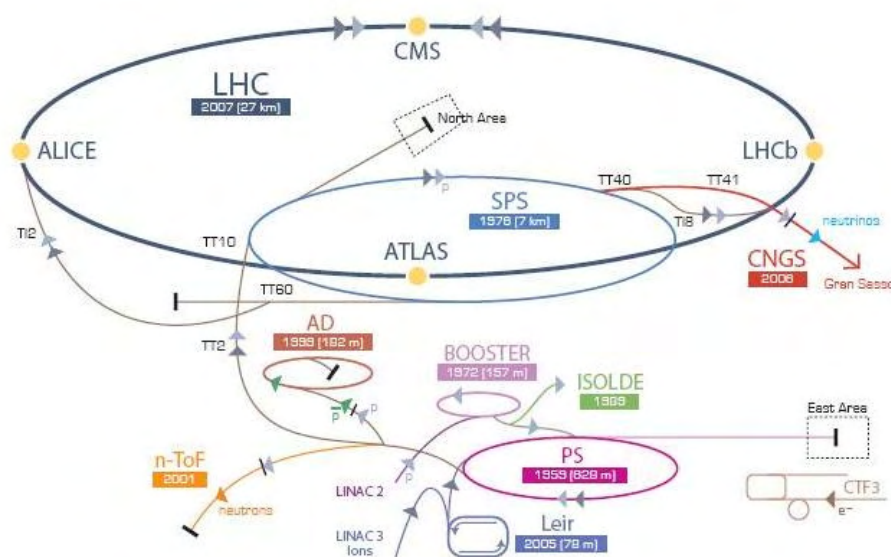


Abbildung 2: Beschleunigerkomplex am CERN

Um Antiteilchen zu Elektron, Proton oder Neutron herzustellen, werden sehr hohe Energien, wie sie etwa beim Urknall vor 4,5 Milliarden Jahren geherrscht haben, benötigt. Wie hoch die Energie genau sein muss, hängt nach der bekannten Formel $E = m \cdot c^2$ von Einstein davon ab, welche Masse die Teilchen haben, die erzeugt werden sollen. Weiterhin haben viele Experimente gezeigt, dass bei der Erzeugung eines Teilchens stets das passende Antiteilchen entsteht. Entsteht also ein Proton, so findet man stets auch ein Antiproton. Um dieses Pärchen zu erzeugen, wird also mindestens die doppelte Ruheenergie des Protons - und damit mindestens $2 \cdot 938 \text{ MeV} = 1876 \text{ MeV}$ - benötigt.

Diese Produktion von Antiteilchen geschieht unter anderem in der „Antimaterie-Fabrik“ am CERN in Genf.

Dort werden Protonen, die zuvor durch Ionisation von Wasserstoff hergestellt wurden, mithilfe von Teilchenbeschleunigern auf sehr hohe Energien gebracht. Im sogenannten Linac2 (Linear Accelerator 2) werden die Protonen zunächst vorbeschleunigt, bevor ihre Energie im Protonen Synchrotron (PS) weiter erhöht wird (vgl. Abbildung 2).

Ist die Energie der Protonen hoch genug, lässt man sie schließlich auf ein sogenanntes Target aus Kupfer oder Iridium treffen (vgl. Abbildung 3). Dort werden die Protonen abrupt gestoppt, wobei ihre komplette Energie in einem kleinen Raumbereich auf einmal frei wird und das Target stark erhitzt wird. Unter diesen extremen Umständen kann es zu einer Umwandlung von Energie in Materie kommen, d.h. es kann unter anderem ein Proton - Antiproton - Paar entstehen.

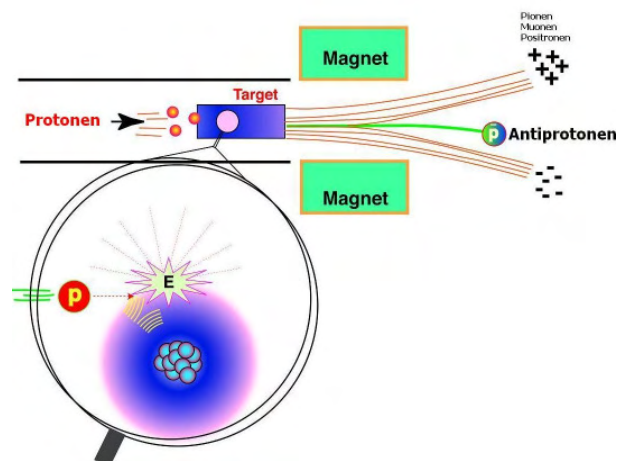


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Antiprotonenproduktion

Da der Prozess jedoch sehr unwahrscheinlich ist, müssen zur Erzeugung eines einzigen Proton - Antiproton - Paares im Schnitt 1 Million Protonen das Target treffen. Da am CERN 10 Trillionen ($= 10^{18}$) Protonen pro Tag erzeugt und auf das Target beschleunigt werden können, stehen insgesamt 10^{12} Antiprotonen pro Tag für weitergehende Experimente zur Verfügung.

Die auf diese Weise erzeugten Antiprotonen verhalten sich jedoch zunächst wie eine panische Menschenmenge: Sie bewegen sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass das gerade erzeugte Antiproton in Kontakt mit umliegender Materie kommt, was eine sofortige „Annihilation“ zur Folge hätte. Bei dieser Annihilation „vernichtet“ sich das Antiteilchen mit einem entsprechenden Teilchen, wobei die Energie in Strahlung (Photonen) oder leichtere Teilchen - Antiteilchen - Paare umgesetzt wird. Damit aber der ganze Aufwand nicht umsonst war, und die erzeugten Antiprotonen für Experimente verwendet werden können, müssen sie direkt nach ihrer Erzeugung in einer Teilchenfalle gesammelt werden. Am CERN geschieht dies im Antiproton Decelerator (AD), wo die Antiprotonen stufenweise gebremst werden, um für Experimente zur Verfügung zu stehen.

Aufgabe 1

Skizzieren Sie kurz die wichtigsten Stationen von der Entdeckung der Antimaterie bis heute!

Aufgabe 2

Beschreiben Sie, wie am CERN Antiprotonen hergestellt werden! Welche Energie ist mindestens notwendig, um ein Antiproton zu erzeugen?

Aufgabe 3

Stellen Sie sich vor, Sie arbeiten bei CERN und erhalten von der Illuminati den Auftrag 1 Gramm Antiprotonen herzustellen. Als Auftragsbestätigung sollen Sie der Illuminati die geschätzte Arbeitszeit und die geschätzten Kosten mitteilen!

	Schätzung	Ausführung
Arbeitszeit		
Kosten		

Die dazu notwendigen Daten können Sie einem Laborbuch entnehmen:

- Pro Tag werden etwa 10^{12} Antiprotonen am CERN hergestellt
- Die Masse des Protons beträgt $m_{p^-} = m_{p^+} = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg
- Um 10^{12} Antiprotonen herzustellen benötigt man etwa $7,2 \cdot 10^5$ kWh
(Mit 1 kWh kann man etwa 25 Stunden Licht einer 40 Watt Glühbirne erhalten)
- Die Kosten für 1 kWh betragen etwa 10 Cent

Ionenkanone gegen Krebs

Jährlich erkranken in Deutschland etwa 350 000 Menschen an Krebs. Diese Menschen werden konventionell neben Chemotherapie mit elektromagnetischer Strahlung wie etwa Röntgenstrahlung, Gamma-Strahlung oder noch höherenergetischen Photonen behandelt. Diese heute verfügbaren Behandlungsmethoden versagen jedoch bei etwa einem Drittel der Patienten, deren Tumore bei der Erstdiagnose noch keine Fernabsiedlungen haben. In diesen Fällen sind andere, nichtkonventionelle Therapieformen dringend notwendig. Bei einem Teil dieser bislang noch nicht behandelbaren Tumoren verspricht der Einsatz von hochenergetischen Ionenstrahlen eine erhebliche Verbesserung der Behandlungserfolge. Dies zeigt sich unter anderem an der GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung) in Darmstadt, wo seit 1997 etwa 60 Patienten pro Jahr auf diese Weise behandelt werden.

Die Therapie mit hochenergetischen Ionenstrahlen, die in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden, ist insofern vorteilhaft, dass gegenüber der konventionellen Bestrahlung die Energie nahezu vollständig innerhalb des kranken Gewebes und damit deutlich günstiger deponiert wird. Diese Tatsache ist in Abbildung 1 zu erkennen, in welcher die relative Dosis, die proportional zur abgegebenen Energie ist, für verschiedene Bestrahlungsmethoden in Abhängigkeit der Wassertiefe aufgetragen ist. Da unser Gewebe hauptsächlich aus Wasser besteht, entspricht der Verlauf dieser Abbildung auch der Energieabgabe der Strahlen in unserem Gewebe.

Abbildung 1 vergleicht die Dosisverteilung von hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung, also Röntgen - oder γ - Strahlung, mit derjenigen von Teilchenstrahlung mit Energie im Bereich von 250 MeV / u bzw. 300 MeV / u. Man erkennt deutlich, dass die relative Dosis von hochenergetischen Photonen bei geringer Tiefe zunächst ein Maximum hat und danach exponentiell abnimmt. Das Maximum der Bestrahlungsdosis liegt bei dieser Behandlungsart je nach Photonenenergie wenige Zentimeter unter der Haut, sodass bei tiefer liegenden Tumoren die Dosis vor dem Tumor wesentlich größer ist als im Zielvolumen selbst. Das gesunde Gewebe wird somit stark belastet, wohingegen die Dosis im Tumor eventuell noch zu gering ist. Um die Dosis im kranken Gewebe zu erhöhen, ohne das gesunde Gewebe nachhaltig zu schädigen, benutzt man die sogenannte Kreuzfeuer - Technik. Dazu wird der Tumor aus verschiedenen Richtungen bestrahlt, wodurch jedoch nicht nur die Dosis im Tumor selbst sondern gleichzeitig auch die insgesamt verabreichte Dosis ansteigt. Diese ist nun lediglich auf ein größeres Volumen verteilt. Die Belastung des gesunden Gewebes ist bei dieser Kreuzfeuer - Technik also weiterhin hoch, wodurch etwa eine Tumorbildung im Bereich des Gehirns so gut wie unmöglich ist.

Eine günstigere Möglichkeit zur Behandlung von tieferliegenden Tumoren mit geringer Belastung des gesunden Gewebes, ist der Einsatz von hochenergetischen Ionenstrahlen. Gemäß Abbildung 1, steigt bei der Behandlung mit ^{12}C - Ionen die relative Dosis mit wachsender Eindringtiefe zunächst leicht an, erreicht ein hohes, wohl lokalisiertes

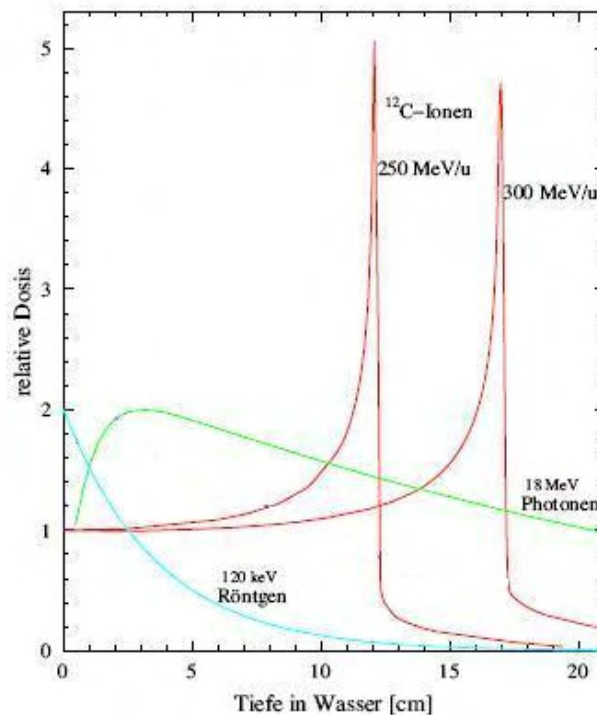


Abbildung 1: Relative Dosis in Abhängigkeit der Wassertiefe



Abbildung 2: Patientenpositionierung vor der Ionenstrahlentherapie

Maximum und fällt danach steil ab. Diesen Verlauf kann man sich anschaulich folgendermaßen erklären: Die Ionen wechselwirken über ihre Ladung mit dem Gewebe und dies geschieht je nach Geschwindigkeit unterschiedlich stark. Die zu Beginn sehr schnellen Ionen passieren das Gewebe so schnell, dass sie kaum eine Chance haben, mit den Atomen - sei es mit dem Atomkern oder der Hülle - zu wechselwirken. Dabei ist die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit des Ions mit der Atomhülle noch sehr viel höher als die mit dem Atomkern, da die Hülle einen sehr viel größeren Raum einnimmt. Kommt es zur Wechselwirkung zwischen Ion und Atomhülle, so regt das Ion das Atom entweder an oder ionisiert es. Dabei verliert es an kinetischer Energie und wird mit wachsender Eindringtiefe immer langsamer. Demnach kann das Ion in größerer Eindringtiefe länger mit den Elektronen des Gewebes wechselwirken. Dabei steigt die abgegebene Energie stark an und hat ihr Maximum am Ende der Teilchenbahn.

Die am Ende der Bahn deponierte Energiemenge ist absolut gesehen sehr gering. Der ionisierende Strahl schädigt das Gewebe daher nicht durch Temperaturerhöhung, sondern greift direkt an den chemischen Bindungen an und zerstört die Tumorzellen und deren DNA auf diese Weise. Bei dieser Methode ist das Verhältnis von unerwünschter Schädigung des gesunden Gewebes und erwünschter Schädigung im Tumor um ein Vielfaches günstiger als bei konventioneller Strahlung.

Diese Tatsache verdeutlicht auch Abbildung 3, in der links die Ionenbestrahlung und rechts die Photonenbestrahlung gezeigt sind (Die Farbskala reicht von rot entsprechend 100 % bis violett mit 10 % der Zieldosis)

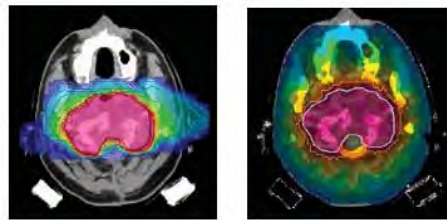


Abbildung 3: Vergleich von Kohlenstoffbestrahlung (links) und Photonenbestrahlung (rechts)

Die Eindringtiefe der Ionen hängt gemäß Abbildung 1 davon ab, mit welcher Energie die Teilchen auf das Gewebe treffen, d.h. welche Energie ihnen in einem Teilchenbeschleuniger zugeführt wurde. Während für die Bestrahlung von Augentumoren mit Protonen schon eine Energie von 60 bis 90 MeV ausreicht, werden für tiefer liegende Tumore 160 bis 220 MeV verwendet. Um nun auch komplex geformte Tumore zu behandeln, wurde an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt das sogenannte Rasterverfahren entwickelt.

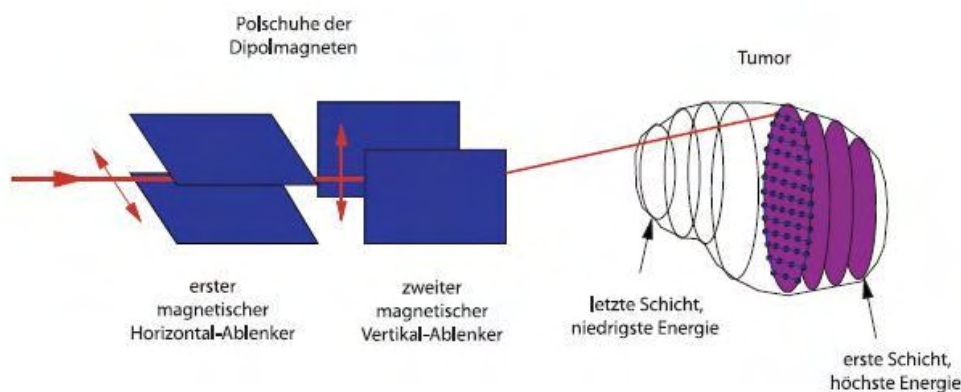


Abbildung 4: Rasterverfahren

Wie Abbildung 4 zeigt, wird dabei das Tumolvolumen, das zuvor mittels Kernspin- oder Computertomographie exakt lokalisiert wurde, zunächst in Schichten gleicher

Tiefe eingeteilt. Innerhalb einer Schicht wird nun der Teilchenstrahl mittels Magnetfelder sowohl horizontal als auch vertikal abgelenkt, d.h. der Strahl tastet diese Schicht rasterförmig ab. Dabei verweilt der Strahl solange an einer Stelle, bis die berechnete Solldosis erreicht ist. Zweckmäßig beginnt man bei diesem Verfahren mit der am tiefsten liegenden Schicht und benötigt somit zu Beginn Teilchen mit großer Energie. Diese Teilchenenergie wird dann im Teilchenbeschleuniger von Schicht zu Schicht auf immer kleinere Energien geregelt. Die Methode ermöglicht es, die Dosisverteilung in niemals zuvor erreichter Präzision an den Tumor anzupassen. Dazu ist es allerdings auch notwendig, das Zielvolumen, in diesem Fall den Patienten, exakt zu positionieren. Für den Patienten bedeutet dies, dass er sich und speziell den zu bestrahlenden Bereich wenn möglich überhaupt nicht bewegen darf. Um dies zu gewährleisten müssen die Patienten während der Bestrahlung von Gehirntumoren eine eigens angefertigte Fixierungs - Maske tragen, die keine Bewegungsfreiheit gestattet. Tumore in Bauch - oder Brustraum werden aber trotz äußerer Fixierung durch die Atmung und durch den Herzschlag bewegt, was die Behandlung in diesen Bereichen stark erschwert, jedoch nicht unmöglich macht.

Aufgabe 1

Welche Probleme ergeben sich bei der konventionellen Strahlentherapie?

Aufgabe 2

Nennen Sie Vorteile der Bestrahlung mit Ionen!

Aufgabe 3

Wo sehen Sie Schwierigkeiten / Grenzen der Behandlungsmethode mit Ionen?

A.2 Schülerskript

Die Paulfalle

oder

„Verdammt ich bin gefangen!“

1) Was versteht man unter einer Paulfalle?

Ist dies etwa eine Falle, mit der man Paulmäuse besonders gut fangen kann?! Da wir uns mit Physik beschäftigen möchten, ist eine solche Falle wohl kaum gemeint... Die Paulfalle verdankt ihren Namen vielmehr ihrem Entwickler Wolfgang Paul, der für seine Leistungen 1989 zusammen mit seinen Kollegen Hans Dehmelt und Norman Ramsay den Nobelpreis erhielt.



Abbildung 1: Nobelpreisverleihung 1989 an W. Paul

Die Glückwünsche von Carl XVI. Gustav von Schweden zur Verleihung dieses Nobelpreises an Professor Wolfgang Paul sind in Abbildung 1 zu sehen. Was genau aber hat dieser Herr Paul mit seinen Kollegen geschaffen, d.h. was verstehen Physiker unter einer Paulfalle? Kurz gesagt ist eine von Paul entwickelte Falle eine Art Käfig, in dem geladene Teilchen mit Hilfe eines elektrischen Wechselfeldes in einem kleinen Raumbereich über einen langen Zeitraum gespeichert werden können.

2) Wozu sind diese Fallen gut?

Was macht jedoch das Speichern von Teilchen so bedeutsam, dass W. Paul dafür sogar den Nobelpreis bekommen hat? Diese Frage wird beantwortet, wenn man sich etwa die Verwendung von Paulfallen in der Forschung anschaut. Die Tatsache der kontrollierten Fixierung eines geladenen Teilchens in einem kleinen Raumbereich ermöglicht es, einzelne kleine Teilchen, z.B. Ionen nahezu ungestört über einen langen Zeitraum zu

untersuchen und somit weitere Erkenntnisse über den Mikrokosmos zu bekommen. Dies ist vor allem in der Atom - und Quantenphysik aber auch in der Chemie von großem Interesse. In der Atomphysik werden Paulfallen etwa zur hochpräzisen Spektroskopie von Ionen verwendet. Ein aktuelles und interessantes Einsatzgebiet der Paulfallen ist im Bereich von Atomuhren zu finden. Mithilfe eines Cäsiumstrahls wird momentan eine Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-15}$ realisiert. Diese nur schwer vorstellbare Zahl bedeutet in der Praxis, dass eine Uhr dieser Genauigkeit in 10 Millionen Jahren nur um eine Sekunde von der exakten Zeit abweicht. Aber damit nicht genug! In den folgenden Jahren sind noch beeindruckendere Verbesserungen geplant, die unter anderem am „National Institute for Standards and Technologies“ in Boulder mit Hilfe von Paulfallen realisiert werden können (vgl. Abbildung 2). Durch das Speichern einzelner Quecksilberionen in einer linearen Falle soll eine Genauigkeit erreicht werden, die eine Uhr in 10 Milliarden Jahren nur um eine zehntel Sekunde falsch gehen lässt (Nur als Information: Unser Universum wird etwa auf dieses Alter geschätzt!). Solch genaue Uhren finden unter anderem Anwendung bei Navigationssystemen wie GPS (Global Positioning System).

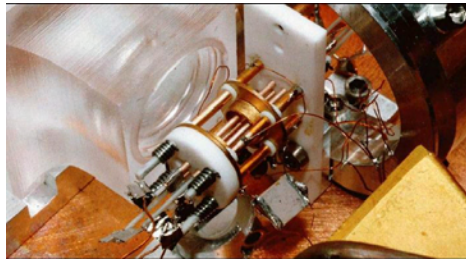


Abbildung 2: Lineare Paulfalle als Atomuhr

Aber auch im Hinblick auf sogenannte Quantencomputer, an deren Entwicklung derzeit intensiv geforscht wird, sind Paulfallen ein experimenteller Ansatz, der verfolgt wird. Die sogenannten Quantenbits könnten dann durch die gezielte Manipulation einzelner, gefangener Ionen mit Laserlicht realisiert werden. Ein solcher Quantencomputer könnte im Vergleich zu herkömmlichen Computern mehrere Rechnungen parallel durchführen. So könnte ein Quantencomputer beispielsweise in der Zeit, in der ein gewöhnlicher PC 32 Bit verarbeitet, mehr als 4 Milliarden Bits verarbeiten, was viele interne aufwändige Rechenverfahren enorm beschleunigen würde.

3) Wie funktioniert eine Paulfalle?

Wie aber ist es möglich, Teilchen in einem von Wolfgang Paul entwickelten Käfig zu speichern? Einen ganz normalen Drahtkäfig um das Teilchen zu bauen wäre wohl wenig Erfolg versprechend, da man sehr kleine Teilchen untersuchen möchte, die dann entweder doch entweichen könnten oder die man bei zu dichten Gitterstäben nicht mehr beobachten könnte. Benutzt man allerdings elektromagnetische Felder, kann ein solcher Teilchenkäfig realisiert werden. Es bleibt jedoch noch zu klären, welche Eigenschaften die dabei verwendeten Felder erfüllen müssen. Da man das Teilchen gerne an einer

bestimmten Stelle, z.B. dem Symmetriepunkt der Falle fixieren möchte, muss an jedem anderen Ort außerhalb des Symmetriepunktes (bzw. der Symmetrieachse) eine Kraft wirken, die das Teilchen zum Symmetriepunkt befördert. Diese Kraft F muss umso größer sein, je größer der Abstand r des Teilchens vom Symmetriepunkt ist, d.h.

$$F \propto r$$

Ein Potential, das eine entsprechende Kraft auf ein geladenes Teilchen erzeugt ist ein so genanntes Quadrupolpotential

$$\Phi(x, y, z) = \frac{\Phi_0}{r_0^2} \cdot (ax^2 + by^2 + cz^2)$$

wobei r_0 die Fallengröße und Φ_0 die Potentialtiefe charakterisiert und x , y und z den Ort innerhalb der Falle angeben.

Was macht nun ein Teilchen, das sich in einem solchen Potential befindet? Generell kann man sich ein Potential wie ein Gebirge vorstellen. Wie jeder schon einmal beobachtet hat, rollt eine Kugel in den seltensten Fällen den Berg eines Gebirges hinauf, sondern rollt immer zum niedrigsten Punkt. Analog verhält sich ein geladenes Teilchen in einem elektrischen Potential, d.h. es bewegt sich zum Ort des niedrigsten Potentials.

In einer Paulfalle sieht das Quadrupolpotential bzw. das Gebirge folgendermaßen aus:

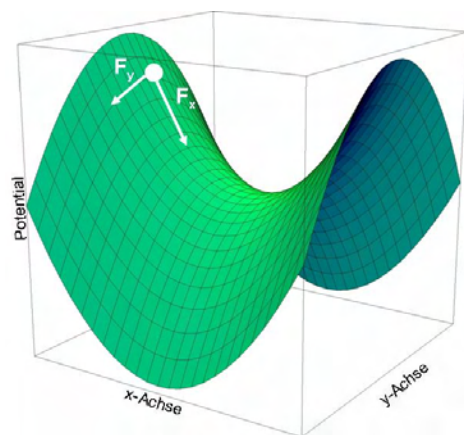


Abbildung 3: Statisches Quadrupolpotential

Eine Kugel, welche sich an der oberen Stelle des abgebildeten Gebirges befindet, rollt schräg den Sattel herunter und erfährt eine fokussierende Kraft F_x zum Sattelmittelpunkt, aber auch eine defokussierende Kraft F_y . Die Kugel würde also aus diesem Gebirge herausrollen. Analog würde ein geladenes Teilchen dieses statische Quadrupolpotential verlassen. Würde das Potential in der Falle also zu jedem Zeitpunkt aussehen wie in Abbildung 3 gezeigt, könnten damit keine Teilchen gespeichert werden...

Aber, nicht verzagen... nun ist das Ziel schon in Sichtweite! Um das Verlassen der Falle zu verhindern, klappt man die Sattelform einfach früh genug um. Somit sieht das Potential eine halbe Periodendauer T später wie in Abbildung 4 gezeigt aus. Zu diesem

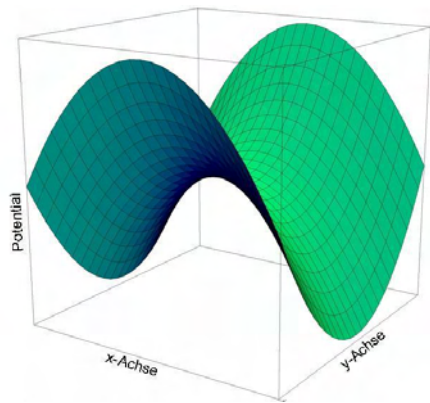


Abbildung 4: Quadrupolpotential in einer Paulfalle nach $t = \frac{T}{2}$

Zeitpunkt ist F_x defokussierend und F_y fokussierend.

Wenn nun die Sattelform mit der richtigen Frequenz umgeklappt wird, bleibt eine resultierende rücktreibende Bewegung in Richtung des Symmetriepunktes bestehen und das Teilchen ist gespeichert.

Woher weiß man aber, wann das Sattelpotential umgeklappt werden muss, d.h. welche Frequenz die angelegte Wechselspannung haben muss?

Dazu folgendes Gedankenexperiment:

Stellen Sie sich vor, Sie wollten auf einem Tischtennisschläger zunächst eine leichte Kugel und danach eine schwere Kugel an einem bestimmten Punkt des Schlägers „fixieren“.

Um die leichte Kugel an einem Punkt festzuhalten, müssen Sie den Schläger schneller hin und her bewegen, als bei einer schweren Kugel, da die leichte Kugel aufgrund ihrer geringeren Trägheit schneller in Bewegung gesetzt wird.

Ähnliches kann man sich für ein geladenes Teilchen überlegen. Die Frequenz, mit der das Sattelpotential umgeklappt werden muss, hängt von der Masse m des Teilchens ab. Bei fester Ladung e des Teilchens gilt: Je größer $\frac{e}{m}$ ist, d.h. je kleiner die Masse im Vergleich zur Ladung, desto häufiger muss der Sattel umgeklappt werden. Es gilt sogar:

$$\frac{e}{m} \propto \omega^2 \quad .$$

Weiterhin muss bei größerem $\frac{e}{m}$ der Betrag der Auslenkung und damit der Betrag der Wechselspannung U kleiner gewählt werden, d.h.

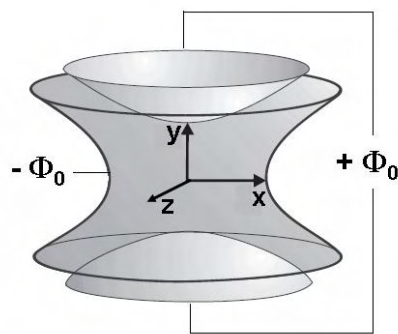
$$\frac{e}{m} \propto \frac{1}{U} \quad .$$

4) Wie kann eine Paulfalle gebaut werden?

Wer sich irgendwann einmal näher mit den theoretischen Grundlagen von Paulfallen beschäftigt, wird feststellen, dass man grundsätzlich zwei mögliche Geometrien für solche Fallen unterscheidet.

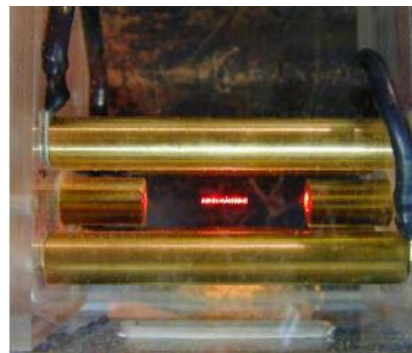
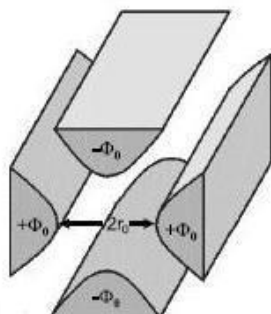
a) Punktsymmetrische Falle

Die Geometrie einer punktsymmetrischen Falle ist in den unteren Abbildungen gezeigt - sie besteht aus zwei Kappenelektroden und einer Ringelektrode. Um in dieser Teilchen zu fangen, können beispielsweise die beiden Kappenelektroden auf eine Wechselspannung gelegt und die Ringelektrode geerdet werden. Die Teilchen in einer punktsymmetrischen Falle sind immer in allen drei Raumrichtungen an den Symmetriepunkt gebunden.



b) Lineare Falle

Die Geometrie einer linearen Falle ist in den unteren Abbildungen gezeigt - sie besteht aus 4 parallelen Stäben. Das rechte Photo demonstriert, dass es tatsächlich möglich ist, Kakaopulver in einer solchen Falle zu fixieren, wenn jeweils gegenüberliegende Stäbe auf gleichem Potential liegen. Im Unterschied zur punktsymmetrischen Falle werden die Teilchen in der linearen Falle nur in zwei Raumrichtungen gebunden und können sich entlang der Symmetrieachse parallel zu den Stäben ungehindert bewegen.



In Paulfallen für makroskopische Teilchen verwendet man einen Laser, der die Teilchen durch das Streulicht sichtbar macht.

A.3 Einführungsvorlesung



Gliederung

1) Was ist eine Paulfalle?

Anwendungen von Paulfallen

Wie funktioniert die Speicherung in einer Paulfalle?

2) Von der Paulfalle zum Teilchenbeschleuniger

Anwendungen von Teilchenbeschleunigern

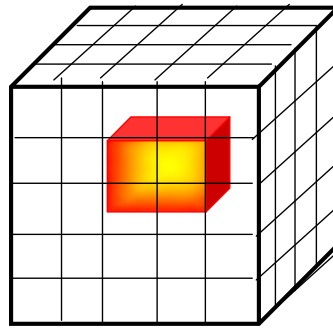
Prinzip eines Teilchenbeschleunigers

Was ist eine Paulfalle?



(Bild aus <http://www.logiphys.de/bilder/mausefalle.jpg>)

Fängt man damit Paulmäuse?



Eine Paulfalle ist ein Käfig für **geladene** Teilchen!



(Bild aus W. Paul: Elektromagnetische Kräfte für geladene und neutrale Teilchen. Phys. Bl., Band 46, 1990)

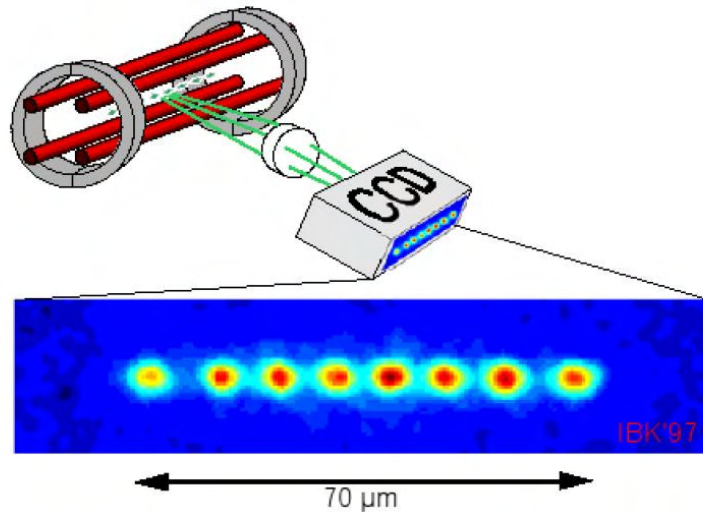
Carl XVI. Gustav von Schweden gratuliert Wolfgang Paul zur Verleihung des Nobelpreises 1989

Anwendungsgebiete

Kontrollierte Fixierung eines geladenen Teilchens in einem kleinen Raumbereich ermöglicht...

- ... genaue Lokalisation von Ionen für Spektroskopie
- ... lange Messdauer für Präzisionsmessungen
- ... Quantenmechanische Untersuchungen an einem einzelnen Ion (Quantencomputer?)

Quantencomputer



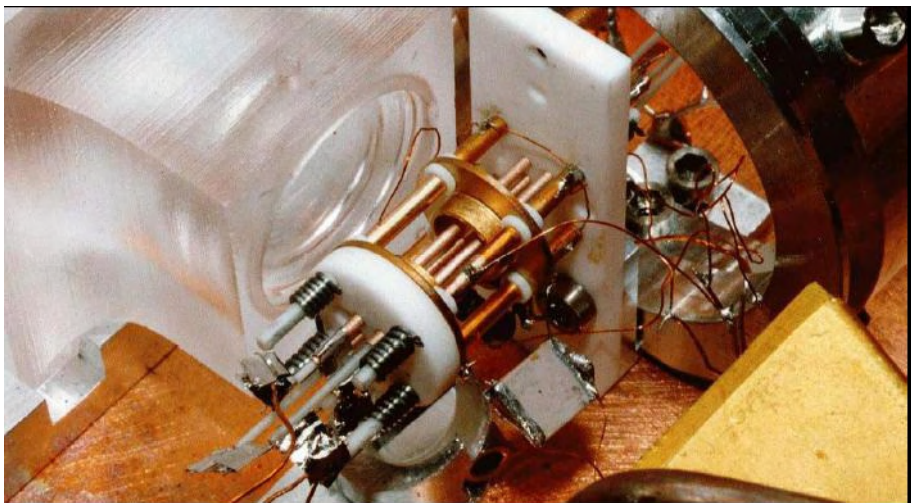
(Abbildung aus http://www.treutner.at/docs/studium/Quantencomputer_L2_handout.pdf)

Ion dient als „Quantenbit“ mit zwei inneren Zuständen, die sich mit Laserstrahlen manipulieren lassen

Herkömmlicher PC: Verarbeitung von 32 Bit
Quantencomputer: verarbeitet in gleicher Zeit mehr als 4 Milliarden Bit

Atomuhr

Aktuelle Genauigkeit: $3 \cdot 10^{-15}$



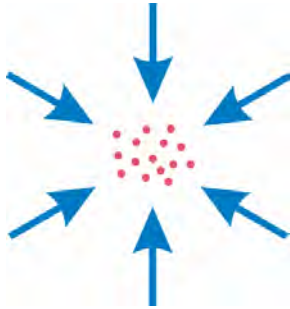
(Atomuhr am National Institute for Standards and Technologies in Boulder, USA)

Ziel:

Durch Speicherung eines einzelnen Quecksilberions Genauigkeiten bis zu 10^{-17} erreichen

Funktionsweise

Speicherung erfolgt über die Bindung an einen Symmetriepunkt:



Für alle Orte außerhalb des Symmetriepunktes muss gelten:

$$F \propto r$$

=> Anlegen eines Quadrupolpotentials:

$$\phi(x, y, z, t) = (\phi_0 / r_0^2) (\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2)$$

α, β und γ
bestimmen die
Geometrie der
Falle

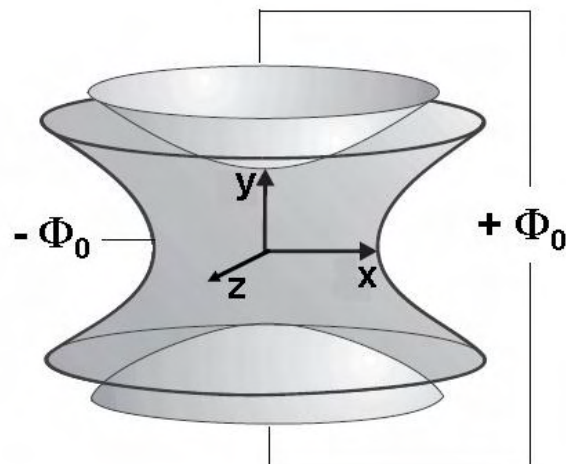
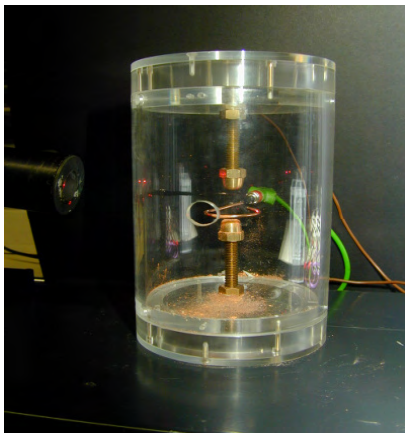
x, y und z sind die
Koordinaten im
Raum

Laplace – Gleichung
liefert 2 mögliche
Geometrien:

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

Die punktsymmetrische Falle

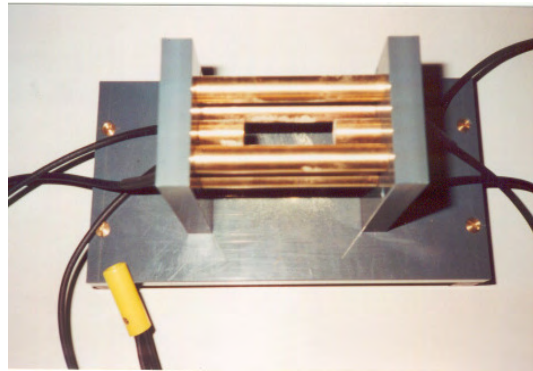
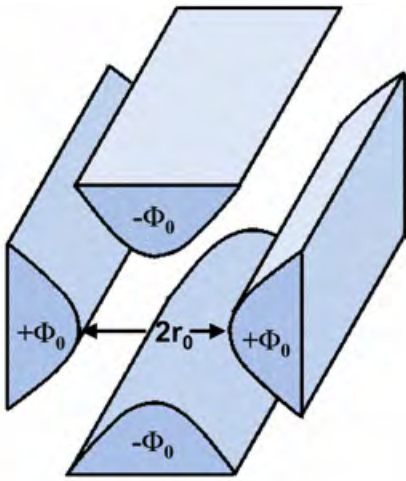
$$\alpha = \gamma \text{ und } \beta = -2\alpha, \text{ d.h. } \phi(x, y, z, t) = \phi_0 / r_0^2 (x^2 - 2y^2 + z^2)$$



Kappenelektroden liegen auf dem gleichen Potential ($+\Phi_0 = U \cdot \sin(\omega t)$)
Ringelektrode liegt auf anderem Potential ($-\Phi_0 = \text{Masse}$)

Die lineare Falle

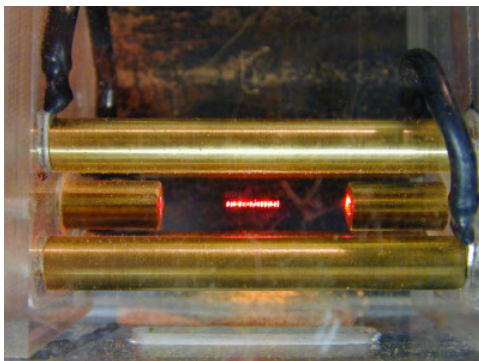
$\alpha = -\beta = 1$ und $\gamma = 0$, d.h. $\phi(x,y,z,t) = \phi_0 / r_0^2(x^2 - y^2)$



Jeweils gegenüberliegende Stäbe befinden sich auf gleichem Potential (z.B. $+\Phi_0 = U \cdot \sin(\omega t)$ und $-\Phi_0 = \text{Masse}$)

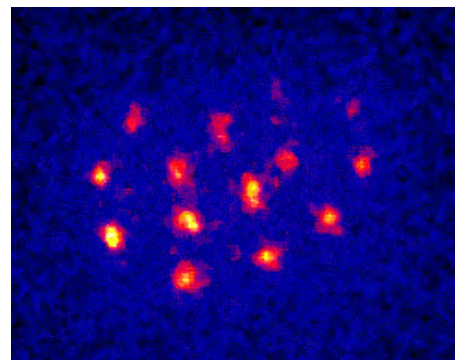
Paulfallen

Kakao in einer linearen Falle

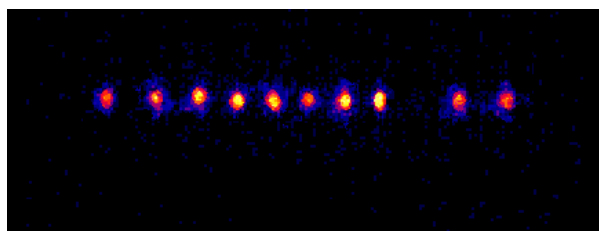


(Arbeitsgruppe Wendt, Universität Mainz)

Kristall aus Ca - Ionen

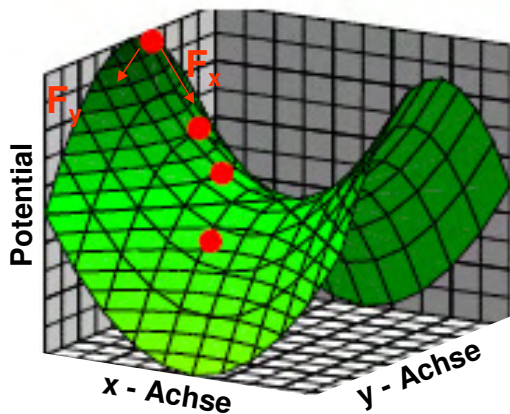


(Arbeitsgruppe Werth, Universität Mainz)



(Arbeitsgruppe Werth, Universität Mainz)

Funktionsweise

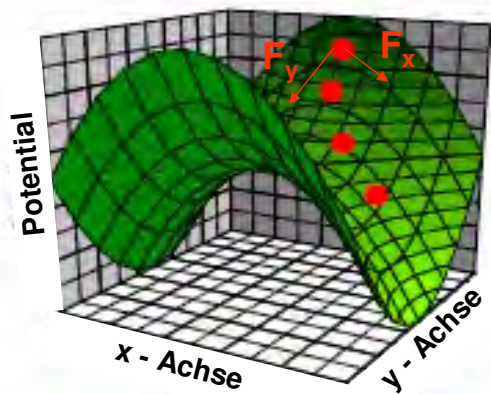


Zunächst (linkes Bild): F_x fokussierende und F_y defokussierende Kraft

⇒ Teilchen würde das Potential verlassen

⇒ Umklappen des Sattelpotentials

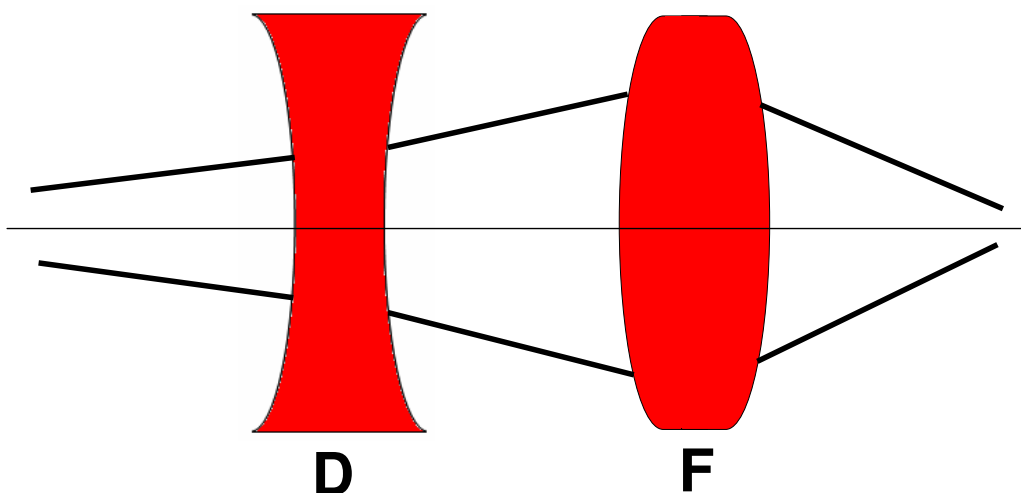
Dann (rechtes Bild): F_x defokussierende und F_y fokussierende Kraft



Funktionsweise

Im zeitlichen Mittel folgt aufgrund der Inhomogenität des Feldes, dass der fokussierende Anteil überwiegt.

Prinzip der starken Fokussierung:



Speicherprinzip

Speicherparameter der Falle: **Frequenz und Amplitude**



Abstimmung auf **Masse** und **Ladung** des Teilchens

Je größer das Verhältnis von **e/m** desto **größer** muß die **Frequenz** sein und desto **kleiner** die Amplitude der angelegten **Wechselspannung**

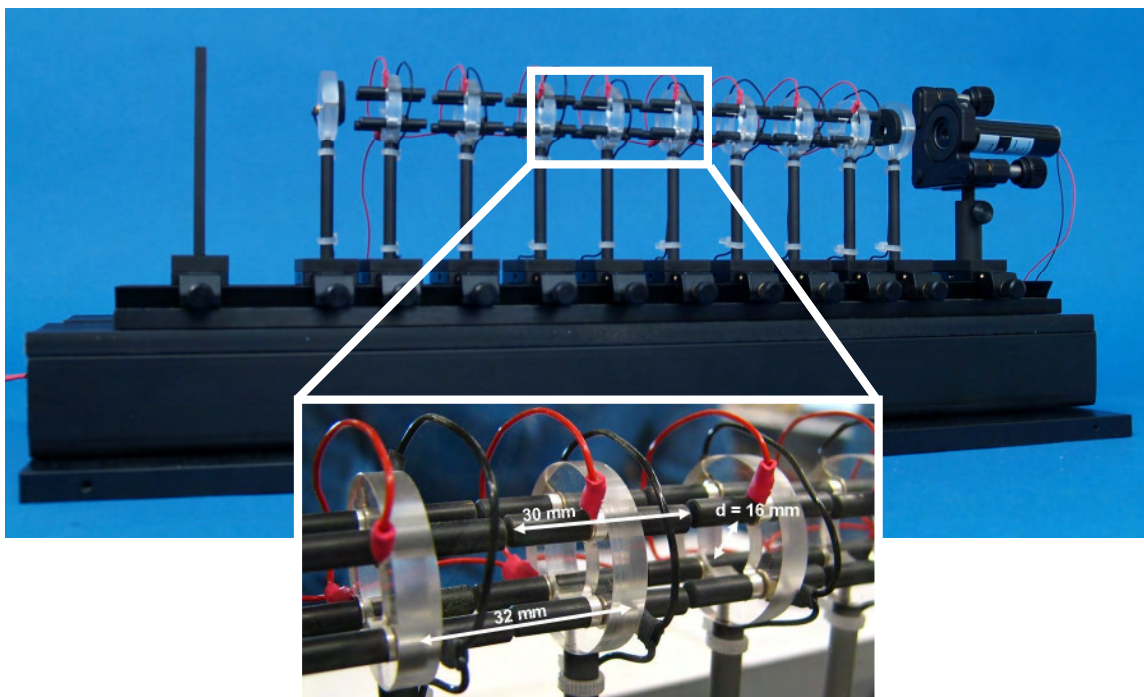
$$\begin{array}{l} e/m \sim \omega^2 \\ e/m \sim 1/U \end{array}$$

Typische Werte für Makroteilchen (z. B. Bärlappsporen oder Kakao):

Frequenz: 50 Hz, Spannung: ~4000 Volt

Eigenes Projekt

Bau eines linearen Beschleunigers mit mehreren Paulfallen:



(Arbeitsgruppe Wendt, Universität Mainz)

Forschung und Anwendung

1) Erzeugung von Teilchen

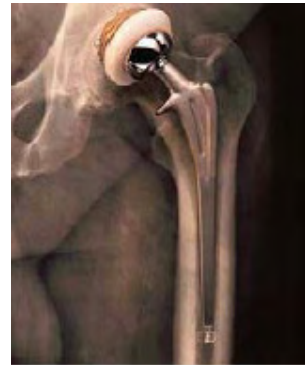


2) Tumorbekämpfung



(Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt)

3) Härtung von Oberflächen

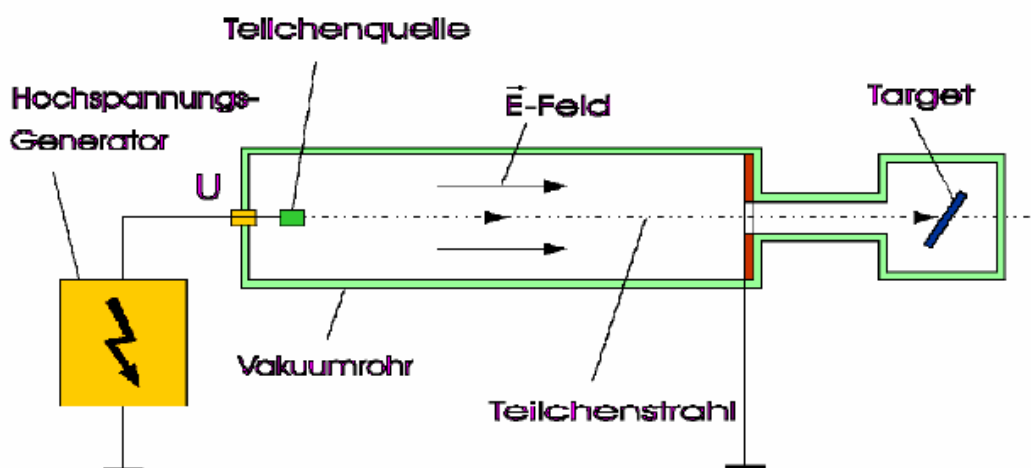


(<http://www.ati.ac.at/~amedphys>)

4) Sterilisierung von Nahrungsmitteln

5) ...

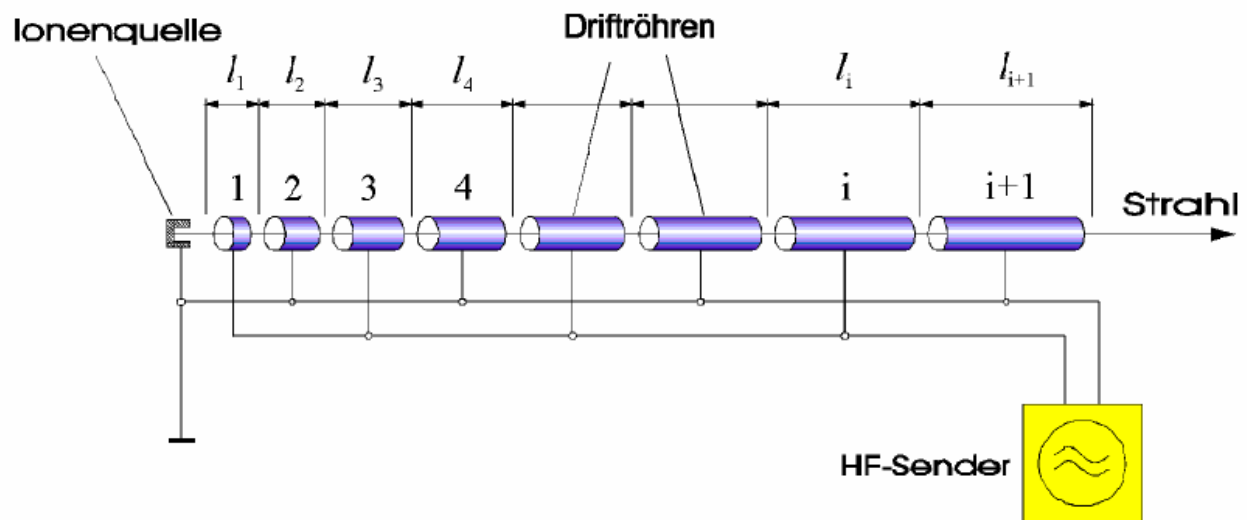
Gleichspannungsbeschleuniger



(Abbildung aus <http://www.maxlab.lu.se/acc-phys/teach/mnx301/2004/Klaus%20Wille/Historie.pdf>)

- Elektrostatisches Feld zwischen zwei Elektroden
- Energie der Teilchen bestimmt durch $q \cdot U$
- Energie begrenzt auf einige MeV

Der Linearbeschleuniger

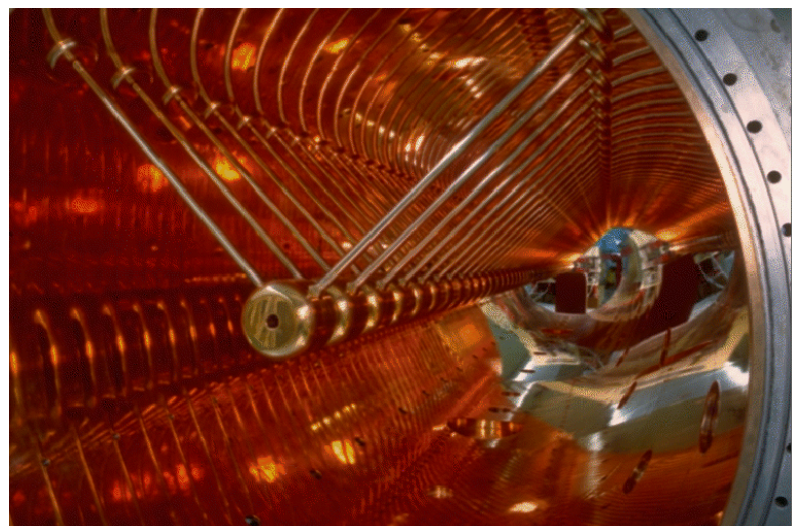
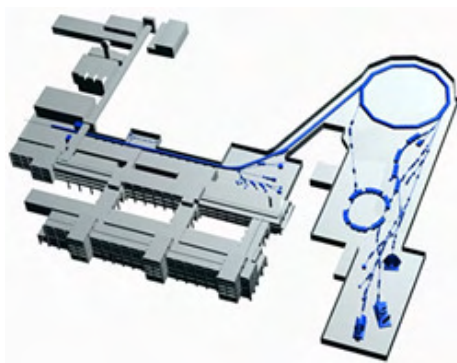


(Abbildung aus <http://www.maxlab.lu.se/acc-phys/teach/mnx301/2004/Klaus%20Wille/Historie.pdf>)

- Beschleunigung mit HF-Wechselfeld
- Energie nach der n-ten Röhre: $E_n = n \cdot q \cdot U$

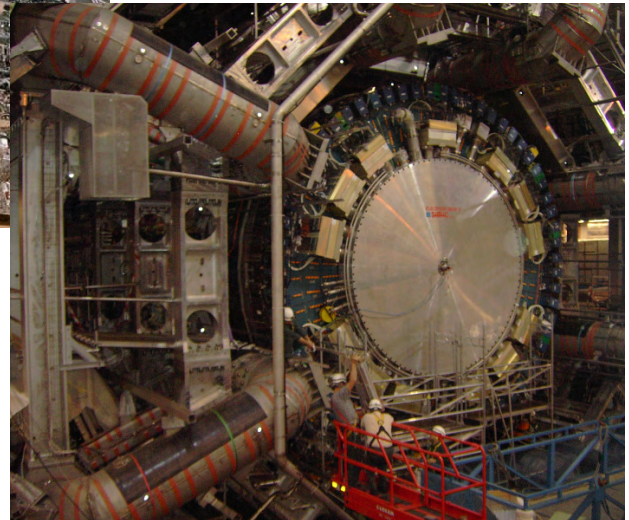
GSI

Gesellschaft für Schwerionenforschung



CERN

Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire



Aufbau der Fallen

Material:

- 2 Kappenelektroden
- 1 Ringelektrode
- 2 Holzteller mit Leisten als Abstandshalter
- 3 Kabel
- 2 Stecker
- 3 kleine Lötfahnen
- 2 Widerstände ($1\text{M}\Omega$)
- 1 lange Schraube aus Nylon
- 7 Muttern aus Nylon
- Plexiglaszylinder
- Laserpointer
- Laserhalter incl. kleiner Nylonschraube



(Arbeitsgruppe Wendt, Universität Mainz)

Los geht's !



The End

A.4 Die Paulfalle aus dem Supermarkt

In diesem Teil wird der Bau einer einfachen punktsymmetrischen Paulfalle für Makroteilchen beschrieben, zu dem lediglich Materialien benötigt werden, die z.B. in einem Kaufhaus erworben werden können. Auf diese Weise ist es möglich, dieses sehr aktuelle „Forschungswerkzeug“ der modernen Atomphysik mit relativ wenig Aufwand direkt in den Klassenraum zu bringen. Alles was dazu in der Schule im Voraus vorhanden sein muss, sind einfache Werkzeuge wie etwa LötKolben und ein Bohrer. Der Bau dieser „Paulfalle aus dem Supermarkt“ läuft im Prinzip analog zum Bau der Fallen an der Universität ab (vgl. Kap. 4.2.2). Auf eigens in einer mechanischen Werkstatt angefertigte Materialien wird dabei vollständig verzichtet.

Die Elektroden werden erneut aus drei großen Lötösen (z.B. Innendurchmesser 18,2 mm, Außendurchmesser 25,2 mm) zusammengebaut. Während eine Lötöse direkt als Ringelektrode verwendet werden kann, muss an die beiden anderen Lötösen zusätzlich eine Unterlegscheibe (z.B. 5,5 mm \times 20 mm \times 1,2 mm) gelötet werden. Diese großen Lötösen werden wieder analog zu Kap. 4.2.2 an kleinere Lötösen (z.B. M6) gelötet und mit Kabeln versehen. Dann erst können die Elektroden auf die Schraube (z.B. M6 \times 40 mm) gesteckt werden. Lötösen, Kabel und Kunststoffschrauben sind in jedem Elektronik-Fachhandel, z.B. im Internet unter <http://www.buerklin.com/> oder bei <http://www.ettinger.de/> zu erwerben, wohingegen Unterlegscheiben in dieser Größen in Baumärkten unter Karosserie - oder Kotflügelscheiben zu finden sind.

Um nun die Schraube mit den Elektroden zu befestigen, können anstelle der Holzteller aus Kap. 4.2.2 z.B. auch handelsübliche Bierdeckel verwendet werden. Um ein Berühren der Elektroden auszuschließen, kann statt einem in der Werkstatt angefertigten Plexiglaszylinder auch einfach eine abgesägte 1,5 l PVC - Flasche (z.B. Mineralwasser o.ä.) benutzt werden. Da bei Schülerexperimenten jedoch nur 25 V Nennspannung erlaubt sind [A⁺03] und das Lernziel mit 25 V Nennspannung nicht zu erreichen ist, muss zum Testen der Falle stets der Lehrer als Aufsicht dabei sein. Als zusätzliche Sicherheit sollte in den Stecker der Hochspannungselektrode ein Widerstand (z.B. 1 M Ω) gelötet werden, der bei einem versehentlichen Berühren der Elektroden den Strom auf einen ungefährlichen Wert begrenzt. Werden die Elektroden tatsächlich mittig in der Flasche angebracht, so kann die Öffnung dieser Plastikflasche zusätzlich dazu verwendet werden, den Laser zu befestigen. Da die Öffnung jedoch gewöhnlich größer ist als der Durchmesser eines Laserpointers, kann Knete zur Laserfixierung in der Flaschenöffnung verwendet werden.

Um die notwendigen Wechselspannungen im Kilovoltbereich zum Speichern der Teilchen zu erhalten, kann man eine Wechselspannungsquelle mit etwa 50 Hz verwenden, z.B. einen Regeltrafo - oder weitaus sicherer - einen Regeltrenntrafo. Hierbei ist auf die Phasenlage zu achten und diese Spannung kann dann mit dem passenden Windungsverhältnis auf etwa 3 - 4,5 kV hochtransformiert werden.

B Dankeschön

An dieser Stelle ein großes Dankeschön an alle, die zum Gelingen meiner Examensarbeit beigetragen haben.

Danke an...

... Annette und Klaus für die Bereitstellung dieses interessanten Themas und die tolle Betreuung in einem angenehm lockeren Arbeitsklima, das vieles vereinfacht hat.

... die Arbeitsgruppe LARISSA mit Kerstin, Eva, Fabio, Tina, Christoph, Sebastian, Christian, Thomas und Klaus mitsamt den HiWis William, Christian und Rosa für die insgesamt sehr, sehr angenehme und lockere Atmosphäre und die ganzen unterhaltsamen sportlichen Aktivitäten auf dem Fußballplatz, am Kicker und beim Schnitzelesen...

... die Jungs der Arbeitsgruppe für die unermüdliche Hilfe mit dem TeXnicCenter, wenn dieses mal wieder ein Eigenleben vortäuschte und die Unterstützung bei den technischen Problemen an den Beschleunigermodellen, bei der sie der Hochspannung teilweise wieder ein Stückchen näher kamen...

Insbesondere möchte ich an dieser Stelle Fabio für die häufigen Korrekturen meiner Arbeit und stets überaus freundliche Beratung danken!

... die Mädels im „Lehrerzimmer“ für die schöne Bürozeit mit den netten, ausgiebigen Kaffeepausen am Morgen, Vormittag, Mittag, Nachmittag und Abend und für die vielen Formulierungshilfen beim Schreiben und Tina für die leckeren, selbstgemachten Kuchen...

... William für die kreativen Lötkunstwerke mit viel Fingerspitzengefühl und dafür, dass er das entwickelte Projekt in Zukunft weiterführen wird.

... Simon und seinen Onkel Christoph Thilmann, die mir einen Besuch in der Praxis für Strahlentherapie in Neuwied ermöglicht haben und dort Vor- und Nachteile der Ionenstrahlentherapie aufgezeigt haben.

... das Werkstattteam und insbesondere Peter Becker für die bemerkenswerte Hilfsbereitschaft zu jeder Zeit und die Anfertigung der Modellbauteile.

... Frau Kirch für die tollen Photos meiner Modelle, die nun in meiner Examensarbeit glänzen.

... meinen Freund Henning und meine Familie, die mich das komplette Studium über

mit aufmunternden Worte immer wieder unterstützt haben und ohne die ich es wahrscheinlich nicht so weit geschafft hätte.

C Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keine Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mainz, den 21. Februar 2007, _____