

Technische Universität Dresden
Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften
Fachrichtung Physik
Institut für Kern- und Teilchenphysik

Master-Arbeit im Fach Physik,
Studiengang Höheres Lehramt an Gymnasien (Master)

Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau

vorgelegt von: Rebecca Schmidt, geb. am 22.05.1991
Betreuer und 1. Gutachter: Prof. Dr. Kobel
2. Gutachter: Prof. Dr. Pospiech
eingereicht am 30.07.2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Physikalische Grundlagen	3
2.1	Das Standardmodell	3
2.1.1	Wechselwirkungen	4
2.1.2	Ladungen	7
2.1.3	Elementarteilchen	9
2.1.4	Aufbau von Materie: Hadronen	14
2.1.5	Erhaltungssätze	14
2.1.6	Natürliche Einheiten	15
2.1.7	Gravitation	16
2.2	Die Blasenkammer	16
2.2.1	Die Historie der Blasenkammer	16
2.2.2	Der Aufbau und die Funktionsweise der Blasenkammer	17
2.2.3	Physikalische Hintergründe der Blasenkammer	19
2.2.4	Grenzen der Blasenkammer	31
2.2.5	Blasenkammereinsatz heute	32
3	Didaktische Überlegungen zu den Unterrichtsmaterialien	35
3.1	Medien im Unterricht	35
3.1.1	Einsatz von Bildern	36
3.1.2	Digitale Medien	37
3.1.3	Arbeitsblätter	39
3.2	Motivation und Interesse	39
3.3	Einordnung in die Curricula	41
3.3.1	Bildungsstandards	41
3.3.2	Einheitliche Prüfungsanforderungen für das Abitur	43
3.4	Einsatz von Blasenkammeraufnahmen	44
4	Die Unterrichtsmaterialien	47
4.1	Lernziele und Lernvoraussetzungen	47
4.2	Technische Voraussetzungen	56

4.3	Einstieg	56
4.3.1	Verknüpfung zur Medizin	57
4.3.2	Weitere mögliche Anknüpfungspunkte	59
4.4	Erarbeitung von Grundlagenwissen	61
4.4.1	Einführung in die Blasenkammer	61
4.4.2	Einführung in GeoGebra	63
4.5	Die Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen	64
4.5.1	Aufbau und Einsatz der Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen	64
4.5.2	Übersicht über die Ziele der Aufgabenblätter	68
4.5.3	Links zu den digitalen Materialien	71
4.6	Lernzielkontrolle	72
5	Ausblick	73
6	Abbildungsverzeichnis	75
7	Tabellenverzeichnis	79
8	Literatur	81
	Anhang	85

1 Einführung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Unterrichtsmaterialien zum Thema Blasenkammer erarbeitet. Dazu wurden Blasenkammeraufnahmen der 2 m großen Blasenkammer am CERN verwendet, die bereits in digitaler Form vorlagen. Diese wurden so aufbereitet, dass zum einen digitale Arbeitsblätter in GeoGebra und ergänzend analoge Arbeitsblätter basierend auf den Blasenkammeraufnahmen zur Verfügung stehen. Die digitalen Arbeitsblätter bieten eine automatische Feedbackfunktion und stellen eine Hilfefunktion zur Verfügung. Auf der Grundlage dieser Materialien ist es möglich, den Schülern¹ einen Einblick in den Aufbau, die Funktionsweise und die Auswertung von Aufnahmen einer Blasenkammer zu geben.

Im Folgenden werden zunächst die physikalischen Grundlagen erläutert, die den Unterrichtsmaterialien zugrunde liegen. Anschließend werden didaktische Überlegungen zu den Unterrichtsmaterialien vorgestellt. Darauf folgt das Kapitel zu den Unterrichtsmaterialien. In diesem werden nicht nur die Materialien, sondern auch eine mögliche Einbettung in den Unterricht dargestellt. Abschließend wird ein Ausblick über mögliche Erweiterungen der Unterrichtsmaterialien gegeben.

¹Im Folgenden stehen die maskulinen Formen von Bezeichnungen für Schüler oder auch Lehrer jeweils für beide Geschlechter.

2 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die den Unterrichtsmaterialien zugrunde liegenden physikalischen Grundlagen erläutert. Zunächst wird auf das Standardmodell der Teilchenphysik als Modell zur Erklärung der Prozesse in der Blasenkammer und im Anschluss daran auf Grundlagen zur Blasenkammer eingegangen.

2.1 Das Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die Elementarteilchen mit ihren Ladungen und Wechselwirkungen¹. Auf Grundlage des Standardmodells lassen sich Vorhersagen zu den Umwandlungen der Teilchen ineinander treffen, die aufgrund der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkungen ablaufen.

Durch das Standardmodell können die in der Blasenkammer untersuchten Prozesse beschrieben werden. Einige vom Standardmodell vorhergesagte Teilchen wurden auf Blasenkammeraufnahmen genau entsprechend der Vorhersagen entdeckt (siehe Kapitel 2.2.3). Die aus dem Standardmodell resultierenden Erhaltungssätze bieten die Möglichkeit zur Analyse der Vorgänge in der Blasenkammer.

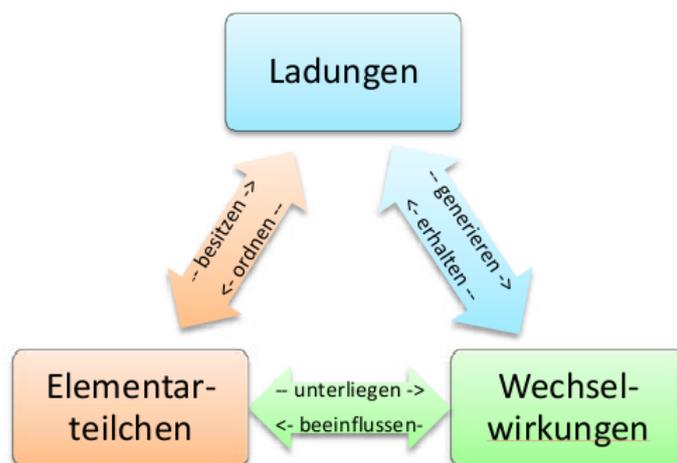


Abbildung 2.1: Das Konzept der Theorie des „Standardmodells der Teilchenphysik“ (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))

¹Die im Standardmodell beschriebenen Wechselwirkungen sind die elektromagnetische Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Die Gravitation wird nicht durch das Standardmodell beschrieben.

Die Elementarteilchen sind das zentrale Element des Standardmodells. Sie werden durch die Ladungen, die sie besitzen, und durch ihre Massen eindeutig charakterisiert. Die Ladungen eines Teilchens bestimmen, welchen Wechselwirkungen es unterliegt.

In diesem Kapitel werden zuerst die Wechselwirkungen, dann die Ladungen und anschließend die Elementarteilchen erläutert. Weiterhin wird der Aufbau der Materie kurz dargelegt und anschließend die Erhaltungssätze und das Einheitensystem in der Teilchenphysik beschrieben. Abschließend wird erläutert, warum die Gravitation durch das Standardmodell nicht beschrieben wird.

2.1.1 Wechselwirkungen

Wechselwirkungen beschreiben die Interaktionen zwischen Elementarteilchen. Die Übertragung von Wechselwirkungen erfolgt durch Botenteilchen, sogenannte Eichbosonen (siehe Kapitel 2.1.3). Durch Emission bzw. Absorption dieser Teilchen wechselwirken die Elementarteilchen miteinander. Dabei kann z.B. Energie und Impuls übertragen werden.

Die Botenteilchen können sogenannte virtuelle Teilchen sein. Dies bedeutet, dass sie die Beziehung $E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2$ nicht erfüllen müssen, m steht für die Ruhemasse des Teilchens, E für seine Gesamtenergie und p für seinen Impuls. Da aber virtuelle Teilchen nicht messbar sind, sondern nur ein Konstrukt zur (mathematischen) Beschreibung des Wechselwirkungsprozesses darstellen, führt dies nicht zum Widerspruch mit Beobachtungen (vgl. Bleck-Neuhaus 2010, Kapitel 9).

Nachfolgend werden die drei fundamentalen Wechselwirkungen beschrieben: die elektromagnetische Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung.

Elektromagnetische Wechselwirkung

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist verantwortlich für den Zusammenhalt von Atomen, d.h. für die Anziehung zwischen Elektronen und dem Atomkern. Sie ist weiterhin ursächlich für die Verbindung der Atome zu Molekülen.

Die in den oben genannten Beispielen beteiligten Teilchen befinden sich nah beieinander. Die elektromagnetische Wechselwirkung kann aber nicht nur bei so nah beieinander befindlichen Teilchen wirken, sie hat vielmehr eine unendliche Reichweite. Dies ist darin begründet, dass das Eichboson, durch welches die Wechselwirkung vermittelt wird, masselos ist und keine Ladungen besitzt. Das Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon. Die Ursache dieser Wechselwirkung ist die elektrische Ladung (siehe Kapitel 2.1.2). Das bedeutet, dass alle Teilchen, die eine elektrische Ladung besitzen, miteinander elektromagnetisch wechselwirken können. Die elektrische Ladung kann sowohl positiv als auch negativ sein. Die Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen mit gleichem Vorzeichen der elektrischen Ladung ist abstoßend, die Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen mit verschiedenem Vorzeichen der

elektrischen Ladung ist anziehend. Die Stärke dieser Wechselwirkung ist durch den elektromagnetischen Kopplungsparameter (Feinstrukturkonstante) $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ gegeben. Die Wechselwirkung zwischen zwei ruhenden Punktladungen wird klassisch durch das Coulombgesetz $F_C = \alpha_{em} \cdot \hbar \cdot c \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$ beschrieben.

Die Theorie, welche die elektromagnetische Wechselwirkung auf Quantenniveau beschreibt, wird als Quantenelektrodynamik (kurz: QED) bezeichnet (vgl. Coughlan und Dodd 1996, Kapitel 5.3).

Schwache Wechselwirkung

Die schwache Wechselwirkung ist für die radioaktive β -Umwandlung² verantwortlich. Die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron verletzt den Messergebnissen zufolge die Energieerhaltung. Die fehlende Energie geht auf ein Teilchen über, das als Neutrino bezeichnet wird und erstmals 1930 von Enrico Fermi mathematisch beschrieben wurde. Das Neutrino wechselwirkt nur schwach und gravitativ. Deshalb wurde es erst sehr spät nach seiner Vorhersage nachgewiesen. Die schwache Wechselwirkung wird von drei verschiedenen Eichbosonen vermittelt: zwei elektrisch geladenen, dem W^+ und dem W^- (wobei ersteres eine positive und zweiteres eine negative elektrische Ladung besitzt) und von einem elektrisch neutralen, dem Z^0 . Weil die Bosonen Masse besitzen, besitzt die Wechselwirkung eine begrenzte Reichweite von 0,002 fm.

Ursache der schwachen Wechselwirkung ist die sogenannte schwache Ladung. Da fast alle Elementarteilchen eine schwache Ladung besitzen (bis auf das Photon, die Gluonen und das Z^0 -Teilchen), unterliegen fast alle der schwachen Wechselwirkung.

Prozesse, die innerhalb der elektromagnetischen Wechselwirkung über den Austausch virtueller Photonen ablaufen, laufen auch über den Austausch des Z^0 -Bosons ab. Im Gegensatz zur elektromagnetischen Wechselwirkung kann nur die schwache Wechselwirkung zu einer Umwandlung verschiedener Quarks ineinander führen³. Diese Umwandlung erfolgt über die Aussendung von W -Bosonen.

Elektroschwache Theorie

Physiker sind stets bestrebt, anscheinend verschiedene Phänomene einheitlich zu beschreiben, um so ein vertieftes Verständnis selbiger zu erlangen. Z.B. beschrieb Maxwell eine mathematisch einheitliche Formulierung von elektrischen und magnetischen Feldern.

In Bezug auf die Wechselwirkungen ist es bisher gelungen, die elektromagnetische und die

²Die β^- -Umwandlung (auch β^- -Zerfall) ist die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino. Die β^+ -Umwandlung (auch β^+ -Zerfall) ist die Umwandlung eines Protons in ein Neutron, ein Positron und ein Elektron-Neutrino.

³Quarks können auch generationsübergreifend umgewandelt werden. Bei elektrisch geladenen Leptonen sind bisher keine generationsübergreifenden Umwandlungen beobachtet worden. Zu dem Begriff „Generation“ siehe Ordnung der Elementarteilchen auf Seite 10.

schwache Wechselwirkung miteinander zu verknüpfen. Das Modell von Glashow, Weinberg und Salam beschreibt diese Verknüpfung (vgl. Coughlan und Dodd 1996, S.143).

Starke Wechselwirkung

Wie im Kapitel 2.1.1 bereits erwähnt, stoßen sich Teilchen mit gleichen Vorzeichen der elektrischen Ladung ab. Da Atomkerne aus Nukleonen (Protonen und Neutronen) bestehen, wäre zu erwarten, dass der Atomkern aufgrund der gleichen elektrischen Ladungen der Protonen instabil ist. Dies ist aber nicht der Fall. Es muss also eine starke anziehende Kraft zwischen den Nukleonen geben, die ihrer elektromagnetischen Abstoßung entgegenwirkt. Diese Kraft wird Kernkraft genannt und ist eine Erscheinungsform der dritten fundamentalen Wechselwirkung: der starken Wechselwirkung.

Die Kernkraft hat nur eine sehr kurze Reichweite von 2 fm, daher kann sie nur zwischen benachbarten Nukleonen wirken. Atomkerne mit sehr vielen Protonen sind nicht stabil, weil auf jedes Proton die elektromagnetische Wechselwirkung aller anderen Protonen im Kern abstoßend wirkt, anziehend wirkt jedoch nur die Kernkraft der direkt benachbarten Nukleonen. Die Kernkraft wirkt zwischen Nukleonen unabhängig von deren elektrischer Ladung, da auch die starke Wechselwirkung unabhängig von der elektrischen Ladung wirkt. Das bedeutet, dass sie auch zwischen Neutronen anziehend wirkt. Wie bereits oben erwähnt, beruht die Kernkraft auf der starken Wechselwirkung. Die Ursache der starken Wechselwirkung sind Farbladungen (siehe Kapitel 2.1.2), also wirkt sie nur zwischen Teilchen, die eine Farbladung besitzen. Es gibt drei verschiedene Farb- bzw. Anti-Farbladungen: „rot“, „grün“ und „blau“ bzw. „anti-rot“, „anti-grün“ und „anti-blau“. Freie Teilchen tragen keine Farbladung. Mesonen bestehen aus einem Quark und einem Anti-Quark, welche eine Farb- bzw. die entsprechende Anti-Farbladung besitzen und sind so per Definition „farbneutral“. Eine weitere Möglichkeit, ein farbneutrales Teilchen zu bilden, ist die Addition aller drei Farben (bzw. Anti-Farben), d.h. durch drei (Anti-)Quarks, welche die drei verschiedenen (Anti-)Farbladungen besitzen.

Die Eichbosonen, welche die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks vermitteln, werden Gluonen genannt. Gluonen besitzen selbst Farb- und Anti-Farbladungen. Deshalb wechselwirken sie auch untereinander.

Insbesondere bei der starken Wechselwirkung ist der Effekt wichtig, dass deren Kopplungsparameter α_s keine Konstante ist, sondern sich mit dem Abstand der Teilchen ändert. Dies ist auch bei den anderen Wechselwirkungen der Fall, wenn auch nicht so stark ausgeprägt. Konkret bedeutet diese Abhängigkeit vom Abstand, dass die Kopplung zwischen Quarks (und Gluonen) bei kleinen Abständen sehr gering ist (asymptotische Freiheit) und mit steigendem Abstand wächst (*Confinement*). Die asymptotische Freiheit beschreibt den Effekt, dass sich die starke Kopplung zwischen Quarks bei kleiner werdenden Abständen immer mehr den kleineren Werten der schwachen und elektromagnetischen Kopplungen annähert. Da der $\frac{1}{r^2}$ Anstieg der Kraft diesen Effekt aber bei Weitem überwiegt, und die Kraft daher immer weiter ansteigt,

kann jedoch auch bei extrem kleinen Abständen von einer quasifreien Bewegung – wie fälschlicherweise oft zu lesen – gar keine Rede sein. Der unglücklich gewählte Begriff „Asymptotische Freiheit“ soll nur ausdrücken, dass die starke Wechselwirkung irgendwann schwächer werden würde als die beiden anderen Wechselwirkungen; allerdings bei Abständen für die wir gar nicht wissen, ob dort das Standardmodell überhaupt noch gilt. Das *Confinement* hingegen beschreibt den Effekt, dass zwischen Quarks bei größer werdenden Abstand im Gegensatz zu den anderen Kräften die starke Kraft nicht auf Null, sondern auf einen endlichen, konstanten Wert sinkt. Ab einem gewissen Abstand wird eine so große Energie zur Separation der Quarks benötigt, dass diese ausreicht, ein Quark-Anti-Quark-Paar zu bilden. Das entstandene Anti-Quark würde sich dann mit dem herausgelösten Quark zu einem Meson verbinden, das neue Quark würde den Platz des entfernten Quarks einnehmen. Das erklärt, weshalb bisher noch kein Quark einzeln beobachtet werden konnte und die starke Wechselwirkung nur eine begrenzte effektive Reichweite von 2 fm besitzt. Analoge Phänomene treten mit Gluonen auf. Die Theorie, welche die starke Wechselwirkung beschreibt, wird Quanten-Chromodynamik (kurz QCD) genannt (vgl. Coughlan und Dodd 1996, Kapitel 5.4, 32 und 33).

2.1.2 Ladungen

Im Folgenden wird auf die elektrische Ladung, die schwache Ladung sowie die starke Ladung eingegangen. Die durch den Namen implizierte Analogie zu den in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Wechselwirkungen ist berechtigt, denn ob ein Teilchen einer Wechselwirkung unterliegt, wird dadurch bestimmt, ob es die der jeweiligen Wechselwirkung zugeordnete Ladung besitzt. Wie stark ein Teilchen durch eine Wechselwirkung beeinflusst wird, hängt u.a. von der Größe der entsprechenden Ladung ab.

Elektrische Ladung

Der spezifische Wert der elektrischen Ladung wurde erstmals im Jahre 1897 durch J.J. Thomson bestimmt. Zwölf Jahre später bekräftigte Millikan in seinem Öltröpfchenversuch die These der Quantisierung der elektrischen Ladung. Die elektrische Elementarladung beträgt $e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (vgl. Ne’eman und Kirsh 1995, S.4). Quantisierung bedeutet, dass alle Ladungen von beobachtbaren Teilchen ganzzahlige Vielfache einer kleinsten Ladungseinheit sind. Wie im Kapitel 2.1.3 beschrieben ist, trifft dies allerdings nicht für alle Elementarteilchen zu. Im Folgenden wird die Ladung eines Teilchens mit $Q = q \cdot e$ bezeichnet, wobei Q die Ladung und q (für beobachtbare Elementarteilchen) eine ganze Zahl ist, die sogenannte Ladungszahl. Die elektrische Ladung ist Ursache der elektromagnetischen Wechselwirkung, dies bedeutet, dass alle Teilchen, die eine elektrische Ladung besitzen, elektromagnetisch wechselwirken. Da die elektrische Ladung Q eines Teilchens sowohl positiv als auch negativ sein kann, kann die elektromagnetische Wechselwirkung anziehend oder abstoßend sein (siehe Kapitel 2.1.1).

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, wird die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung durch den elektromagnetischen Kopplungsparameter $\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$ beschrieben. Da der Kopplungsparameter direkt proportional zum Quadrat der elektrischen Elementarladung e ist, ist diese ein direktes Maß für die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Schwache Ladung

Auch für die schwache Wechselwirkung existiert eine Ladung, die ihre Ursache darstellt. Diese Ladung wird als schwache Ladung I bezeichnet und entspricht der dritten Komponente des schwachen Isospins. Die schwache Ladung kann für Leptonen und Quarks die Werte $I = \pm\frac{1}{2}$ annehmen. Dies bedeutet, dass die Teilchen jeweils in Dupletts mit schwacher Ladung $\{+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\}$ angeordnet werden.

Die schwache Ladung beschreibt, wie stark die Teilchen der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Die schwache Ladung eines zusammengesetzten Teilchens setzt sich aus den schwachen Ladungen seiner Komponenten zusammen (vgl. Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c)).

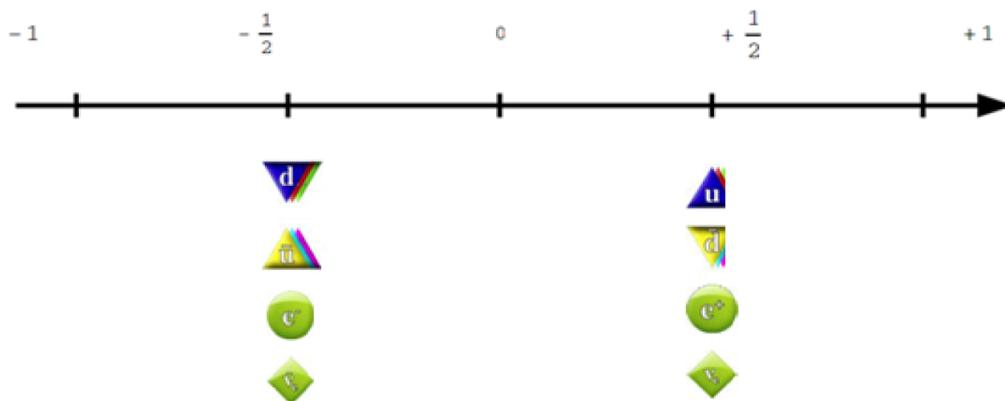


Abbildung 2.2: Schwache Ladungszahlen von Materie und Anti-Materie (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c)), hier werden die Anti-Farben „anti-rot“, „anti-blau“ und „anti-grün“ durch die Farben „cyan“, „gelb“ und „magenta“ dargestellt

Starke Ladung

Das Quarkmodell beschreibt den Aufbau von Hadronen aus Quarks. In diesem Modell kommen auch Teilchen vor, die aus drei gleichen Quarks aufgebaut sind, z.B. das Ω^- , welches aus drei *Strange*-Quarks besteht. Da die drei *Strange*-Quarks in allen bisher erwähnten Ladungen identisch sind, widerspricht dies dem Ausschließungsprinzip von Pauli. Um diesen Konflikt zu

lösen, wurde eine neue Quantenzahl, die Farbladung, eingeführt. Diese Quantenzahl hat keine Gemeinsamkeiten mit den für uns sichtbaren Farben, trotzdem werden in Analogie für die Farbladungen die Bezeichnungen „rot“, „grün“ und „blau“ verwendet. Im Gegensatz zu den für uns sichtbaren Farben haben die Farbladungen der Elementarteilchen Vektorcharakter (siehe Abbildung 2.3). Da zusammengesetzte Teilchen aus drei gleichen Quarks existieren, werden drei Farbladungen benötigt, um sie zu unterscheiden.

Den Anti-Quarks werden Anti-Farben zugeordnet : „anti-rot“, „anti-grün“ und „anti-blau“. Alle beobachtbaren Quarkverbindungen sind stets „farbneutral“.

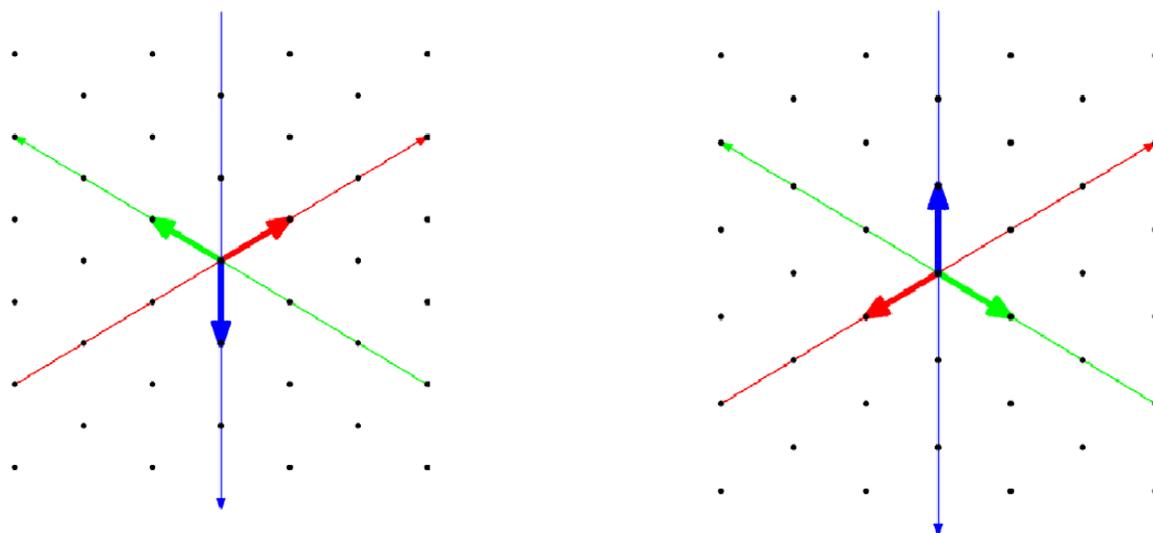


Abbildung 2.3: Veranschaulichung der Farbladungsvektoren (Abbildung links) und der Anti-Farbladungsvektoren (Abbildung rechts) (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))

Mesonen bestehen aus einem Quark und einem Anti-Quark, das heißt Farbladung und Anti-Farbladung neutralisieren sich jeweils gegenseitig. Baryonen sind aus drei Quarks (verschiedener Farbe) aufgebaut, das heißt auch die drei verschiedenen Farbladungen ergänzen sich zu „farbneutral“. Daher ist für ein einzelnes Quark nicht festgelegt, welche Farbladung es besitzt

Die Farbladung ist die Ursache der starken Wechselwirkung . Quarks und Gluonen besitzen eine Farbladung (siehe Kapitel 2.1.1), das heißt nur sie unterliegen der starken Wechselwirkung (vgl. Coughlan und Dodd 1996, Kapitel 31 und 32).

2.1.3 Elementarteilchen

Im Folgenden wird auf die Leptonen, die Quarks, die Eichbosonen sowie das Higgs-Boson eingegangen. Diese Teilchen sind nach heutigen Erkenntnissen Elementarteilchen⁴, allerdings gibt es keinen Beweis dafür, dass diese Erkenntnis der Realität entspricht .

⁴Elementarteilchen heißt, dass es nicht aus anderen Teilchen besteht und somit keine innere Struktur ausweist.

Die Grundbausteine unserer Materie sind Leptonen und Quarks sowie deren Anti-Teilchen. Diese Teilchen sind nach heutiger Erkenntnis punktförmig und besitzen einen Spin von $\frac{1}{2}$ ⁵. Alle Teilchen mit halbzahligem Spin werden Fermionen genannt, alle Teilchen mit ganzzahligem Spin Bosonen .

Die Eichbosonen vermitteln die Wechselwirkungen zwischen den (Anti-)Materieteilchen . Das Higgs-Boson nimmt eine Sonderrolle unter den Elementarteilchen ein, da es weder (Anti-)Materieteilchen noch Eichboson ist. Es ist das einzige Teilchen im Standardmodell, welches Spin 0 besitzt.

Allen Elementarteilchen ist gemein, dass sie erzeugt und vernichtet werden können und dass zu jedem Teilchen ein Anti-Teilchen existiert . Ein Teilchen gleicht seinem Anti-Teilchen in allen Eigenschaften bis auf die Vorzeichen von dessen Ladungen, diese sind genau entgegengesetzt. Wechselwirkt ein Teilchen mit seinem Anti-Teilchen, so können sie sich gegenseitig annihilieren und neue Teilchen erzeugen (vgl. Gerthsen, Meschede und Vogel 2010, Kapitel 19.4).

Ordnung der Elementarteilchen

Die im Standardmodell beschriebenen Materieteilchen sind die sechs Leptonen (Elektron e^- , Myon μ^- , Tauon τ^- , Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ , Tauon-Neutrino ν_τ) und die sechs Quarks (*Up*-Quark u , *Down*-Quark d , *Charm*-Quark c , *Strange*-Quark s , *Top*-Quark t , *Bottom*-Quark b). Jedes Quark kommt mit drei verschiedenen Farbladungen vor. Die Quarks und die Leptonen werden in drei Generationen (auch: Familien) angeordnet. Dabei sind jeweils die beiden Quarks (mit allen Farbladungen) und die beiden Leptonen einer Generation in Dupletts bezüglich der schwachen Ladung mit $I = \pm\frac{1}{2}$ angeordnet (siehe Kapitel 2.1.2).

⁵Das gilt nur in natürlichen Einheiten. Im SI-Einheitensystem wäre der Spin $\frac{\hbar}{2}$.

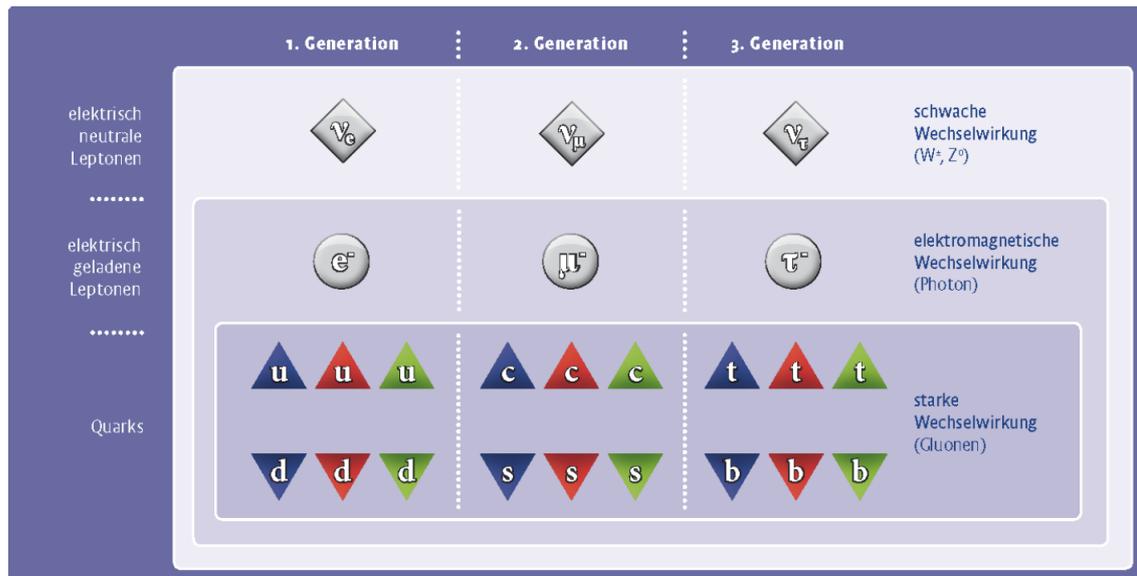


Abbildung 2.4: Anordnung von Materieteilchen im Standardmodell (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c)

Die Partner eines Dupletts können sich durch Abstrahlung bzw. Absorption eines W -Bosons ineinander umwandeln, wenn es der Energieerhalt erlaubt. Die Quarks, die in der oberen Reihe angeordnet sind, besitzen eine elektrische Ladung von $Q = \frac{2}{3}e$, jene in der unteren Reihe eine elektrische Ladung von $Q = -\frac{1}{3}e$.

Die erste Generation umfasst das Elektron und das Elektron-Neutrino sowie die *Up*- und *Down*-Quarks. Das Myon und das Myon-Neutrino bilden mit den *Charm*- und *Strange*-Quarks die zweite Generation. Die dritte Generation umfasst das Tauon und das Tauon-Neutrino und die *Top*- und *Bottom*-Quarks. Mit zunehmender Generation nimmt die Masse der in der Generation enthaltenen Teilchen zu (bis auf die der Neutrinos) (vgl. Griffiths 1996, Kapitel 1.11).

Eichbosonen

Eichbosonen vermitteln Wechselwirkungen zwischen den Quarks und Leptonen und deren gebundenen Zuständen (siehe Kapitel 2.1.1). Bosonen sind Teilchen mit ganzzahligem Spin. Außer den Eichbosonen ist nur noch das Higgs-Boson ein elementares Boson. Alle Eichbosonen besitzen Spin 1. Es gibt drei verschiedene Gruppen von Eichbosonen: das Photon, die W -Bosonen und das Z -Boson sowie die Gluonen.

Das Photon Das Photon ist das Eichboson der elektromagnetischen Wechselwirkung (siehe Kapitel 2.1.1). Es besitzt selbst keine elektrische Ladung, daher können Photonen nicht direkt untereinander elektromagnetisch wechselwirken. Das Photon besitzt keine starke oder

schwache Ladung. Da das Photon masselos ist, hat die elektromagnetische Wechselwirkung eine unendliche Reichweite.

Die W -Bosonen und das Z -Boson Die W -Bosonen und das Z -Boson sind die Botenteilchen, die die schwache Wechselwirkung vermitteln (siehe Kapitel 2.1.1). Die W -Bosonen besitzen eine elektrische Ladung. Es gibt ein W -Boson mit elektrisch positiver Ladung und ein W -Boson mit elektrisch negativer Ladung, die als W^+ und W^- bezeichnet werden. Das Z -Boson besitzt keine elektrische Ladung und wird daher auch als Z^0 bezeichnet. Alle drei Bosonen besitzen eine Ruhemasse, deswegen ist die Reichweite der schwachen Wechselwirkung begrenzt. W^\pm besitzen eine schwache Ladung, jedoch keine starke. Da sie eine schwache Ladung besitzen, können sie untereinander wechselwirken. Z^0 besitzt weder eine starke noch eine schwache Ladung.

Gluonen Gluonen sind die Eichbosonen der starken Wechselwirkung (siehe Kapitel 2.1.1). Sie tragen selbst eine Kombination aus Farbe und Anti-Farbe, d.h. sie können im Gegensatz zu Photonen auch untereinander wechselwirken. Gluonen besitzen keine Masse und keine elektrische Ladung. Insgesamt gibt es für Gluonen acht verschiedene Farb-Anti-Farb-Kombinationen, deshalb gibt es acht verschiedene Gluonen (siehe Abbildung 2.5).

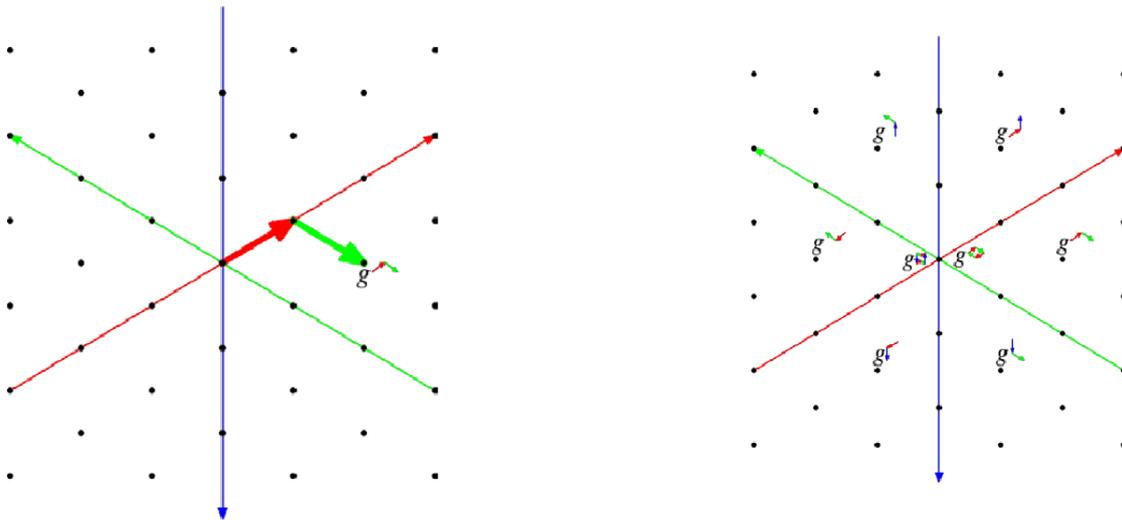


Abbildung 2.5: Farbladungsvektoren von Gluonen: links ein Gluon, das die Kombination aus „rot“ und „anti-grün“ besitzt, rechts die Darstellung aller möglichen Farb- und Anti-Farbladungskombinationen für Gluonen (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))

Der Austausch von Gluonen zwischen Quarks kann zu Änderung der Farbladung der Quarks führen⁶. Wird z.B. zwischen einem „grünen“ und einem „roten“ Quark ein Gluon mit der

⁶Es gibt zwei Gluonen, welche nicht die Kombination einer Farbladung und einer anderen Anti-Farbladung tragen, sondern eine Kombination aus verschiedenen Farbladungen mit den zugehörigen Anti-Farbladungen. Diese sind rechts in Abbildung 2.5 in der Mitte dargestellt. Werden diese Gluonen zwischen Quarks ausgetauscht, so ändert sich deren Farbladung nicht.

Farbladungskombination „rot“ und „anti-grün“ ausgetauscht, so wird das „rote“ Quark in ein „grünes“ und das „grüne“ Quark in ein „rotes“ umgewandelt. Da hierdurch die Farbladungen der Quarks nur vertauscht werden, erhält die Wechselwirkung über Gluonen die Farbneutralität der aus Quarks zusammengesetzten Teilchen (vgl. Gerthsen, Meschede und Vogel 2010, Kapitel 19.4).

Das Higgs-Boson

„Das Higgs-Teilchen ist ein Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik. Es ist eine Anregung des sogenannten Higgs-Feldes⁷. Durch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erhalten die (Anti-)Materieteilchen sowie W - und Z -Teilchen (die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung) ihre Massen (sogenannter Higgs-Mechanismus)“ (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(b)).

Leptonen

Leptonen sind Fermionen, welche keine Farbladung besitzen. Die Neutrinos besitzen darüber hinaus keine elektrische Ladung. Alle anderen Leptonen besitzen die elektrische Ladung $Q = -e$. Alle Leptonen besitzen eine Masse⁸ (zu Leptonen siehe Ne’eman und Kirsh 1995, Kapitel 6.3 und 10.7).

Die elektrisch geladenen Leptonen Das Elektron, das Myon und das Tauon sind die geladenen Leptonen (siehe Abbildung 2.4). Das Elektron ist das zuerst entdeckte Elementarteilchen. Es besitzt eine elektrische Ladung von $Q = -e$ und definierte historisch die Elementarladung. Die anderen beiden elektrisch geladenen Leptonen besitzen die gleiche elektrische Ladung aber eine größere Masse. Die schwache Ladung von elektrisch geladenen Leptonen ist $I = -\frac{1}{2}$.

Neutrinos Zu jedem elektrisch geladenen Lepton existiert ein zugehöriges elektrisch neutrales Lepton. Diese Zugehörigkeit findet sich auch in der Namensgebung wieder, die elektrisch neutralen Leptonen heißen Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tauon-Neutrino. Mit Neutrinos existieren keine gebundenen Zustände, da sie ausschließlich eine schwache Ladung $I = \frac{1}{2}$ besitzen. Neutrinos treten bei Umwandlungsprozessen wie z.B. bei den β -Umwandlungen auf.

Quarks

Quarks sind Fermionen, die eine Farbladung besitzen. Zusammen mit den elektrisch geladenen Leptonen sind sie die Bausteine unserer Materie.

⁷In der modernen Elementarteilchenphysik werden Teilchen durch ihr zugrundeliegendes Feld beschrieben. Die Anregung der entsprechenden Felder kann nur gequantelt erfolgen, wobei eine gequantelte Anregung einem Teilchen entspricht.

⁸Im ursprünglichen Standardmodell besitzen Neutrinos keine Masse. Inzwischen ist jedoch experimentell bestätigt worden, dass mindestens zwei Neutrinos Masse besitzen.

Eine Besonderheit dieser Teilchen ist, dass sie keine ganzzahlige elektrische Ladung besitzen: die Ladung kann entweder $Q = +\frac{2}{3}e$ für die *Up*-, *Charm*- und *Top*-Quarks oder $Q = -\frac{1}{3}e$ für die *Down*-, *Strange*- und *Bottom*-Quarks betragen. Ein Quark und ein Anti-Quark können nur als Paar erzeugt bzw. vernichtet werden. Quarks tauschen ständig Farbladungen über Gluonen aus (siehe Kapitel 2.1.3). Sie können nicht einzeln beobachtet werden, da das *Confinement* (siehe Kapitel 2.1.1) dies verhindert.

Die Quarks mit den gleichen Ladungszahlen, d.h. *Down*-, *Strange*- und *Bottom*-Quark bzw. *Up*-, *Charm*- und *Top*-Quark unterscheiden sich lediglich in ihrer Masse, welche mit zunehmender Generation ansteigt.

2.1.4 Aufbau von Materie: Hadronen

Materie besteht aus gebundenen Zuständen von elektrisch geladenen Leptonen und sogenannten Hadronen. Hadronen sind aus Quarks zusammengesetzte Teilchen und unterliegen deshalb der Kernkraft (siehe Kapitel 2.1.1). Sie werden in zwei Kategorien eingeteilt: in Baryonen und in Mesonen. Baryonen sind aus drei Quarks aufgebaut, Mesonen aus einem Quark und einem Anti-Quark. Da Hadronen stets „farbneutral“ sein müssen, besitzen die drei Quarks eines Baryons alle unterschiedliche Farbladungen (siehe Kapitel 2.1.2). In einem Meson besitzt das Quark eine Farbladung und das Anti-Quark die entsprechende Anti-Farbladung.

M. Gell-Mann und G. Zweig schlugen 1964 erstmals die Zusammensetzung von Hadronen aus Quarks und deren Anti-Teilchen vor (vgl. Ne’eman und Kirsh 1995, S.222). Das Proton ist das bekannteste Baryon, welches aus zwei *Up*-Quarks und einem *Down*-Quark zusammengesetzt ist. Das Proton ist u.a. deshalb stabil, weil es das leichteste Baryon ist. Es ist allerdings noch nicht klar, ob dies nur eine scheinbare Stabilität ist und das Proton doch eine endliche Lebensdauer besitzt. Im Standardmodell besitzt das Proton eine unendliche Lebensdauer.

2.1.5 Erhaltungssätze

In der Quantenphysik werden Erhaltungssätze genutzt, um Aussagen über Umwandlungsprozesse von Teilchen zu treffen. Eine Umwandlung, welche keinem Erhaltungssatz widerspricht, findet auch in der Natur statt. Alle stabilen Teilchen werden durch (mindestens einen) Erhaltungssatz an ihrer weiteren Umwandlung gehindert. Es gibt Größen, die bei allen Wechselwirkungen erhalten bleiben und solche, welche nicht bei allen Wechselwirkungen erhalten bleiben. In diesem Kapitel werden nachfolgend nur Erhaltungssätze genannt, die für alle drei fundamentalen Wechselwirkungen gelten.

Erhaltungssätze sind durch Symmetrien d.h. Invarianzen in der Natur begründet. Dieser Zusammenhang wurde von Emmy Noether mathematisch formuliert. Die Erhaltungssätze in der klassischen Physik betreffen (unter bestimmten Voraussetzungen) Energie, Masse, Impuls, Drehimpuls und elektrische Ladung. In der Quantenphysik sind Energie, Impuls, Spin, elektrische

Ladung, starke Ladung und schwache Ladung erhalten (zu Erhaltungsgrößen siehe Bleck-Neuhaus 2010, Kapitel 11.2 und (Coughlan und Dodd 1996, Kapitel 21 und 32).

Energieerhaltung

Das der Energieerhaltung zugrundeliegende Symmetrieprinzip ist die Invarianz der physikalischen Gesetze unter Zeittranslation, also die Gültigkeit unabhängig vom Zeitpunkt.

Impulserhaltung

Die Impulserhaltung beruht auf der Invarianz der physikalischen Gesetze gegenüber räumlichen Translationen, dies bedeutet die Gültigkeit unabhängig von den betrachteten Ortskoordinaten. Diese Invarianz gilt, wenn der Raum homogen ist.

Erhaltung des Spins

Da die Materieteilchen laut Standardmodell punktförmig sind, ist der *Spin* hier nicht als räumliche Drehung zu verstehen. Die der Erhaltung des *Spins* zugrundeliegende Symmetrie ist die Invarianz der physikalischen Gesetze gegenüber einer Drehung im Raum.

Erhaltung der elektrischen Ladung

Die Erhaltung der elektrischen Ladung ist bereits in der klassischen Physik bekannt. In der Quantenphysik beruht sie auf der Invarianz der physikalischen Gesetze unter „speziellen“ Phasenverschiebungen der Wellenfunktion der Teilchen.

Erhaltung der schwachen Ladung und der starken Ladung

Die Erhaltung der schwachen Ladung und die Erhaltung der starken Ladung sind in der klassischen Physik nicht relevant, diese treten erst bei Betrachtungen im Rahmen der Quantenphysik zutage. Die Symmetrien, welche diesen Erhaltungssätzen zugrunde liegen, sind die Invarianz der physikalischen Gesetze unter verallgemeinerten Rotationen im schwachen Isospinraum bzw. unter allgemeinen Rotationen im Farbraum.

2.1.6 Natürliche Einheiten

In der Teilchenphysik werden Energien in anderen Größenordnungen betrachtet als in der klassischen Physik. Deshalb ist es sinnvoll, eine neue Größenordnung für die betreffenden Einheiten zu wählen. Die neue Einheit - das Elektronenvolt eV - ist die Energie, die ein Elektron besitzt, wenn es eine Potenzialdifferenz von 1 V durchlaufen hat. Die Energie wird dann in Einheiten von eV angegeben, der Impuls in Einheiten von $\frac{eV}{c}$ und die Masse in Einheiten von $\frac{eV}{c^2}$. Oft werden die sogenannten natürlichen Einheiten verwendet, um die Lichtgeschwindigkeit

c aus den Einheiten zu eliminieren. In den natürlichen Einheiten wird $\hbar = c = 1$ gesetzt. Damit besitzen sowohl Energie als auch Impuls und Masse die Einheit eV.

2.1.7 Gravitation

Die Wechselwirkung, die uns aus Alltagserfahrungen am besten bekannt ist, ist jene, die quantenphysikalisch am schlechtesten verstanden ist: die Gravitation. Da es zur Gravitation bis jetzt keine beschreibende Quantenfeldtheorie gibt⁹, wird die Gravitation nicht vom Standardmodell beschrieben (vgl. Ne’eman und Kirsh 1995, S.293 f.).

2.2 Die Blasenkammer

In diesem Kapitel wird der zentrale Gegenstand dieser Arbeit, die Blasenkammer, näher erläutert. Zunächst wird ein kurzer Einblick in die Historie der Blasenkammer gegeben, anschließend werden der Aufbau sowie physikalische Hintergründe erläutert. Abschließend wird auf die Grenzen der Blasenkammer sowie den Einsatz von Blasenkammern heute eingegangen.

2.2.1 Die Historie der Blasenkammer

Im Jahre 1950 begann Donald A. Glaser über einen neuen Detektor in der experimentellen Teilchenphysik nachzudenken. Die „seltsamen Teilchen“¹⁰ waren entdeckt, es war jedoch erst eine geringe Zahl von ihnen beobachtet worden. Glaser erkannte die Notwendigkeit eines neuen Experimentiergerätes als Nachfolger der Nebelkammer, da diese nicht in der Lage war, hinreichend schnell und hochauflösend zu arbeiten. Glaser entwickelte die Blasenkammer und erhielt dafür 1960 den Nobelpreis (vgl. Glaser 1961, S.564-584).

In den darauffolgenden Jahren wurde die Blasenkammer von anderen Physikern weiterentwickelt und verbessert (u.a. von Luis Alvarez), sodass ihre Einsatzmöglichkeiten immer mehr erweitert wurden. Die Blasenkammer war gewissermaßen das Auge der Wissenschaftler auf elementare Teilchen. Es wurden zahlreiche Entdeckungen mit diesem Detektor gemacht, so wurden unter anderem Resonanzen, Z^0 -Teilchen und Lepton-Anti-Lepton-Paare entdeckt (vgl. SEHGAL und ZERWAS 1976, S.483 und Physik Journal 1969, S.177 und Bleck-Neuhaus 2010, S.576). Außerdem bekräftigten die Beobachtungen in der Blasenkammer die Theorie zur drittelzahligen Ladung der Quarks (siehe Kapitel 2.1).

Nachdem die erste Blasenkammer von Glaser noch recht klein war, wurden in der Folgezeit immer größere Kammern gebaut, die einen vergleichbaren finanziellen Aufwand erforderten,

⁹Das Standardmodell ist eine Quantenfeldtheorie.

¹⁰Mit „seltsamen Teilchen“ sind Teilchen gemeint, welche aus mindestens einem *Strange*-Quark (siehe Kapitel 2.1.3) oder einem Anti-*Strange*-Quark bestehen. Zum damaligen Zeitpunkt existierte allerdings noch kein Modell zum Aufbau von Hadronen aus Quarks (siehe Kapitel 2.1.4).

wie die Beschleuniger, denen sie als Detektoren dienten (vgl. Harigel 1975, S.13 f.). Die großen Erfolge rechtfertigten jedoch die hohen Investitionskosten.

2.2.2 Der Aufbau und die Funktionsweise der Blasenkammer

Eine Blasenkammer ist ein Detektor für hinreichend langlebige Teilchen. Dieser Detektor besteht aus einem zylindrischen Metallgefäß, das mit einem verflüssigtem Gas, wie z.B. Wasserstoff gefüllt ist (siehe Abbildung 2.6). Im Folgenden wird diese Flüssigkeit auch als Kammerflüssigkeit bezeichnet. Damit mithilfe der Kammerflüssigkeit Teilchen sichtbar gemacht werden

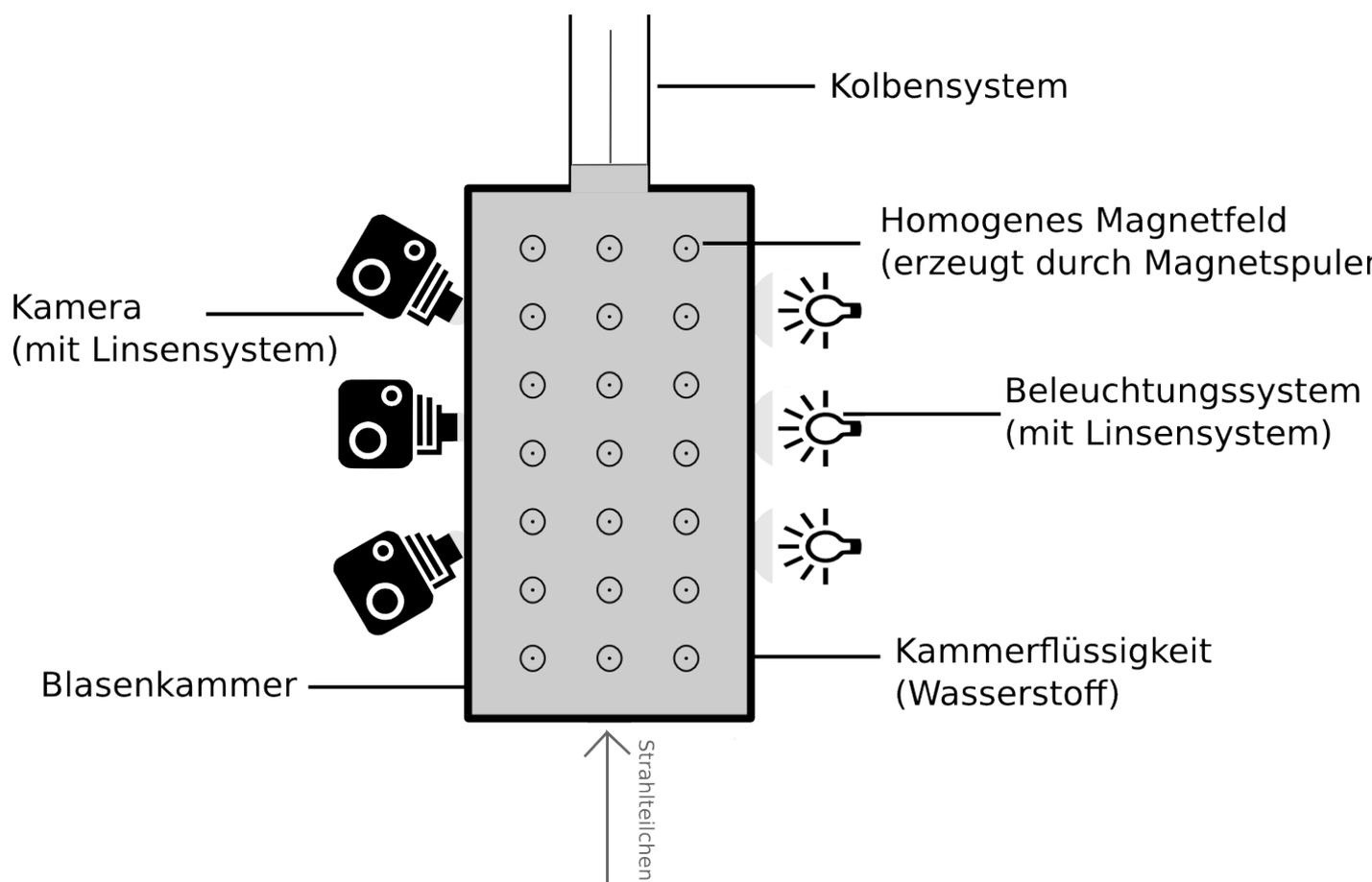


Abbildung 2.6: Der Aufbau der Blasenkammer, erstellt unter Verwendung von camera-34441_1280 (<http://pixabay.com> 2012) und lamp-378369_1280 (<http://pixabay.com> 2014)

können, ist an der Blasenkammer ein Kolben befestigt, mit dem das Volumen der Kammer innerhalb kurzer Zeit vergrößert und verkleinert werden kann. Durch eine Volumenvergrößerung wird der Kammerdruck vermindert und so die Temperatur des Kammerflüssigkeit bis über die Siedetemperatur erhöht. Durchqueren nun in diesem Moment elektrisch geladene Teilchen die Blasenkammer, so dienen sie der Kammerflüssigkeit als Keime zum Sieden und es bilden sich entlang ihrer Spur kleine Bläschen. Durch dünne Fenster aus Metall treten die Teilchen in die Kammer ein und wieder aus. In der 2m großen Blasenkammer am CERN wurden Protonen

als Strahlteilchen verwendet.

Um mehr Rückschlüsse auf die Teilchen zu ermöglichen, wird die Blasenkammer von einem homogenen Magnetfeld durchdrungen, sodass elektrisch geladene Teilchen aufgrund der Lorentzkraft abgelenkt werden. Die entstandenen Teilchenspuren werden mit Blitzlampen beleuchtet und mit Kameras fotografiert, um die Spuren im Anschluss vermessen und auswerten zu können. Anschließend wird das Kammervolumen durch den Kolben wieder verkleinert, sodass die entstandenen Blasen wieder verschwinden. Der Prozess kann wieder von Neuem beginnen und die Spuren der nächsten Teilchen können aufgenommen werden.

Die Helmholtzspulen, die das Magnetfeld im Kammerinneren erzeugen, sind supraleitend. Diese Technologie geht zwar einher mit einem wesentlich höheren Anschaffungspreis als nicht-supraleitende Spulen, es wird beim Betrieb aber kaum Wärme erzeugt. Dies führt dazu, dass im Vergleich viel weniger Energie zur Kühlung der Spulen benötigt wird. Da Wasserstoff nur bei sehr geringen Temperaturen flüssig ist ($14\text{ K} < T < 20\text{ K}$ bei 1 atm), muss die Blasenkammer gut gekühlt werden und gegenüber der Umgebung isoliert sein. Zu diesem Zweck wird die Kammer von einem möglichst gutem Vakuum umgeben. Vakuum¹¹ hat eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, sodass es sich gut zur Isolation eignet. Das gleiche Prinzip wird bei doppelwandigen Thermoskannen angewendet, bei denen der Raum zwischen den Wänden evakuiert ist.

Da man auf den Blasenkammeraufnahmen nicht zwischen Teilchen aus dem Inneren und der Umgebung der Kammer unterscheiden kann, ist die ganze Kammer zur Abschirmung mit einer Eisenhülle umgeben. Ansonsten wären viel mehr Spuren in der Blasenkammer sichtbar, welche die Auswertung der Spuren, die durch die Wechselwirkung von Strahlteilchen und Kammerflüssigkeit verursacht werden, erschweren würden.

Die Kameras fotografieren durch ein System von Linsen in die Blasenkammer hinein, welche zum einen dazu dienen, das Kammervolumen durch Fischaugenlinsen mit wenigen Kameras gut abzudecken, zum anderen wird durch das Linsensystem auch der Temperaturunterschied zwischen Kammerinnerem und Umgebung überwunden. Dies geschieht durch unterschiedliche Materialien der Linsen selbst und zwischen den Linsen.

Die Teilchenspuren werden so fotografiert, dass die Spuren dunkel erscheinen und der Rest der Kammer hell abgebildet wird (vgl. Harigel 1975, S.15-23 und Kleinknecht 2005, S.84).

Die Blasenkammeraufnahmen, die im Rahmen dieser Arbeit für die Erstellung von Unterrichtsmaterialien eingesetzt werden, stammen von der 2 m großen Blasenkammer am CERN. Diese Blasenkammer trägt keinen speziellen Namen. Sie wird stattdessen aufgrund ihrer Länge als 2 m große Blasenkammer bzw. 2 m Blasenkammer bezeichnet.

¹¹Ein „reines“ Vakuum, also absolut leerer Raum, kann nicht künstlich erzeugt werden. Es ist allerdings möglich, die verbleibende Anzahl von Teilchen in einem bestimmten Volumen stark zu reduzieren. Der niedrigste erreichbare Druck liegt unter 10^{-5} Pa. Ein solches Vakuum wird als Ultrahochvakuum bezeichnet.

2.2.3 Physikalische Hintergründe der Blasenkammer

Dieses Kapitel stellt Vorteile der Blasenkammer gegenüber Vorgänger-Detektoren dar, nennt einige Erkenntnisse, welche mithilfe der Blasenkammer gewonnen wurden, und erklärt die physikalischen Hintergründe der im Kapitel 2.2.2 dargestellten Bestandteile der Blasenkammer.

Vorteile und Vermächtnisse der Blasenkammer

Die Blasenkammer ist entwickelt worden, um Kollisionsergebnisse auszuwerten, die mit einer höheren Rate und Energie stattfinden. Da die Flüssigkeit in der Blasenkammer 2-3 Größenordnungen dichter ist als das Gas in ihrem Vorgängermodell, der Nebelkammer, hatte sie den Vorteil einer höheren Auflösung der Teilchenspuren (vgl. Bleck-Neuhaus 2010, S.529), da durch die höhere Dichte des Mediums die zu beobachtenden Teilchen stärker abgebremst werden. So können auch Teilchen mit höheren Energien, in der Kammer abgebremst und zur Reaktion mit der Kammerflüssigkeit gebracht werden. Des Weiteren werden aufgrund der höheren Dichte mehr Ionen entlang der Teilchenspuren gebildet, was eine präzisere Auswertung ermöglicht. In der Blasenkammer erlaubt z.B. die Blasendichte einer Spur einen Rückschluss auf die Masse des Teilchens, von dem die Spur stammt, da ein schwereres Teilchen bei gleichem Impuls eine Spur mit höherer Blasendichte hinterlässt. Das ist darauf zurückzuführen, dass ein langsames Teilchen auf der gleichen Strecke mehr Blasen hervorrufen kann. Dieser Effekt trat zwar auch in der Nebelkammer auf, lässt sich aber aufgrund der größeren Blasendichte erst in der Blasen- kammer zur Auswertung hinzuziehen, weil erst hier ein signifikanter Unterschied sichtbar ist. Darüber hinaus werden die Bilder in der Blasekammer wesentlich „schärfer“ und die Spuren schnellerer Teilchen können ausgewertet werden, da diese Spuren in der Blasen- kammer eine stärkere Krümmung aufweisen oder die Teilchen sogar ganz gestoppt werden (zur Auswertung der Spuren siehe Kapitel 2.2.3).

Da mit der Blasen- kammer eine bessere Auswertung als mit einer Nebelkammer möglich ist, sollte der neue Detektor eine bessere Statistik von seltenen Ereignissen liefern und so auch eine genauere Analyse von den Eigenschaften der Teilchen, wie z.B. *Spin* und Lebensdauer, ermöglichen. Weiterhin erhoffte man sich, bisher unbekannte Zustände zu entdecken, wobei eine besondere Hoffnung der Erforschung von neutralen Teilchen galt.

Die Hoffnung der Physiker wurde nicht enttäuscht. Es sind tatsächlich einige neue neutrale Teilchen mithilfe der Blasen- kammer gefunden worden, unter anderem das Σ^0 und Ξ^0 . In der Blasen- kammer konnten verschiedene Mesonresonanzen und Baryonresonanzen zum ersten Mal beobachtet werden und schließlich untermauerte die Vielzahl der Beobachtungen das Quarkmodell. Dieses Modell basiert auf der Annahme, dass Mesonen aus einem Quark-Anti-Quark-Paar und Baryonen aus drei Quarks bestehen. Die Blasen- kammeraufnahmen lieferten also einen wichtigen Hinweis darauf, dass Hadronen aus Quarks aufgebaut sind.

Die schwache Wechselwirkung wurde ebenfalls wesentlich mithilfe der Blasen- kammer erforscht. So konnten in diesem Detektor das erste Mal schwache neutrale Ströme beobachtet werden.

Auch die Umwandlung von Hadronen mit *Charm*-Quarks oder von geladenen Kaonen über die schwache Wechselwirkung wurde hier beobachtet. Die Entdeckung von zwei neutralen Kaonen mit unterschiedlicher Lebensdauer führte letztendlich zu der Erkenntnis, dass die CP-Invarianz¹² bei schwacher Wechselwirkung verletzt ist. Die Entdeckung des Ω^- lieferte einen Hinweis auf drei verschiedene Farbladungen der Quarks, da es laut dem Standardmodell aus drei *Strange*-Quarks aufgebaut ist. Die Beobachtungen zeigten, dass alle bekannten Quantenzahlen der drei Quarks gleich sind. Nach damaliger Erkenntnis widersprach dies dem Pauli-Prinzip. Man schlussfolgerte daraus, dass entweder das Pauli-Prinzip falsch war, oder eine weitere Quantenzahl existiert, die Farbladung. Heute ist die Theorie der Farbladungen der Quarks als weitere Quantenzahl akzeptiert.

Die Entdeckung des Ω^- war noch aus einem weiteren Grund bahnbrechend: Dieses Teilchen war bereits zuvor sehr genau durch das Quarkmodell beschrieben und vorhergesagt worden. Deshalb beinhaltete die Entdeckung des Teilchens und Bestätigung der Vorhersagen zugleich eine Bekräftigung des Quarkmodells.

Zudem kamen bei der Auswertung der Blasenkammeraufnahmen erstmals Monte-Carlo-Programme großflächig zum Einsatz. Diese Simulationsprogramme dienen der Analyse von Daten und haben ihren Ursprung in Neutrino-Experimenten (vgl. *Bubble Chambers, Technology and Impact on High Energy Physics* und Harigel, *Bubble Chamber and Particle Physics* 1994, S.437).

Vorgänge in der Blasenkammer

Blasenkammern sind häufig mit Wasserstoff als Kammerflüssigkeit betrieben worden. Bei der 2m großen Blasenkammer am CERN, von der die in dieser Arbeit verwendeten Aufnahmen stammen, war das ebenfalls der Fall. Prinzipiell ist jedoch der Einsatz verschiedener Flüssigkeiten möglich. Dies hängt immer von den Versuchsbedingungen sowie vom Versuchsbudget ab. Wasserstoff z.B. hat den Vorteil, dass sich die Kammeraufnahmen einfach deuten lassen, da in der Kammerflüssigkeit nur Elektronen und Protonen vorhanden sind, jedoch keine Neutronen oder größeren Moleküle.

Der Wasserstoff wird bei 5-6 bar in einem blasenfreien Zustand gehalten. Der Kammerdruck wird halbiert und so unter den Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit abgesenkt. Treten nun Teilchen in die Blasenkammer ein, ionisieren sie Atome an denen sich dann dampfgefüllte Blasen bilden (vgl. Bleck-Neuhaus 2010, Kapitel 11.5.2 und Gerthsen, Meschede und Vogel 2010, S.947).

Die Expansion des Kammervolumens wird durch ein Signal des Beschleunigers gesteuert, so dass sich die Kammerflüssigkeit in einem übersättigtem Zustand befindet, wenn die Teilchen die Kammer erreichen. Wenn die Blasen 10 ms lang wachsen konnten, werden sie fotografiert.

¹²Die CP-Invarianz beschreibt die Invarianz gegenüber den Operationen C und P. P beschreibt eine räumliche Spiegelung, C ein Vertauschen aller Ladungsvorzeichen der beteiligten Teilchen. Die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung sind unter CP invariant, die schwache Wechselwirkung ist jedoch nur invariant gegenüber TCP, also einer zusätzlichen Zeitumkehr (vgl. Ne'eman und Kirsh 1995, S.175 ff.).

Anschließend wird das Kammervolumen verkleinert, um die Blasen wieder zu eliminieren. Ein vollständiger Durchlauf dieses Vorgangs dauert etwa 100 ms (Seul 2009, S.4-5). Diese Zeitangaben treffen z.B. auf die 2 m große Blasenkammer zu, können aber je nach Blasenkammer variieren.

Der Einsatz einer Blasenkammer ist nur sinnvoll, wenn die aufgenommenen Bilder der Vorgänge im Inneren der Kammer Rückschlüsse auf physikalische Prozesse zulassen. Hierfür ist Voraussetzung, dass die gebildeten Blasen groß genug sind, damit sie auf den Fotografien sichtbar sind. Um dies zu erreichen, muss der Dampfdruck innerhalb der jeweiligen Blase ausreichend sein, um trotz des von außen aus der Flüssigkeit resultierenden Umgebungsdrucks ein entsprechendes Größenwachstum bewirken zu können. Dafür muss die Temperatur der Kammerflüssigkeit zwischen dem Siedepunkt und dem kritischen Punkt liegen (vgl. Glaser 1961, S.549).

Magnetfeld und Spurkrümmung: Auswertung der Spuren

Dieser Abschnitt befasst sich mit den physikalischen und mathematischen Grundlagen der Auswertung der Spuren. Wie die optische Identifikation der Spuren auf den Blasenkammeraufnahmen vonstatten geht, ist in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

Die Blasenkammer befindet sich in einem homogenen Magnetfeld. Für Blasenkammern werden Magnetfeldstärken von bis zu 3,5 T verwendet (Kleinknecht 2005, S.84). Die Magnetfeldstärke in der 2 m großen Blasenkammer am CERN betrug $B = 1,74$ T (vgl. Helzel 2002, S.59). In der Blasenkammer sind nur geladene Teilchen direkt beobachtbar. Auf geladene Teilchen wirkt die Lorentzkraft $F_L = Q \cdot v \cdot B$ als Zentripetalkraft $F_Z = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$. Das Gleichsetzen der beiden Kräfte ergibt $Q \cdot B \cdot r = \gamma \cdot m \cdot v = p$. Dabei ist Q die Ladung des Teilchens, B die Magnetfeldstärke im Kammerinneren, r der Krümmungsradius der Spur des Teilchens, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ der Lorentzfaktor, m die Masse, v die Geschwindigkeit und p der Impuls des Teilchens (vgl. Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(a)). Für die folgende Betrachtung wird $Q = e$ angenommen¹³. Wird p in Einheiten von $\frac{\text{GeV}}{c}$ (siehe Kapitel 2.1.6), B in Tesla und r in Metern verwendet, so ergibt sich

$$p \approx 0,3 \cdot B \cdot r$$

(vgl. Kleinknecht 2005, S.84). Mit dieser Beziehung lässt sich aus dem Krümmungsradius einer Spur der Impuls berechnen, den das Teilchen besitzt, welches die Spur hinterlassen hat. Hierbei ist zu beachten, dass die Beziehung nur für die Impulskomponente des Teilchens gilt, die senkrecht zum Magnetfeld steht, da die Lorentzkraft nur auf diesen Anteil wirkt (vgl. Seul 2009,

¹³Soll ein Teilchen mit Ladungszahl $q = -1$ betrachtet werden, so müsste die nachfolgende Beziehung $p \approx 0,3 \cdot B \cdot r$ eigentlich mit einem negativen Vorzeichen auf einer Seite der Gleichung versehen werden. Da mit der Gleichung aber nur der Betrag des Impulses berechnet wird, und dieser stets positiv ist, gilt die Gleichung in der angegebenen Form auch für Teilchen mit Ladungszahl $q = -1$.

S.9). In dieser Arbeit werden die Blasenkammeraufnahmen nur zweidimensional ausgewertet und bei den betrachteten Aufnahmen verläuft das Magnetfeld immer senkrecht zur Bildebene. Durch die zweidimensionale Aufnahme entsteht eine Projektion der Teilchenspuren, sodass nur die Komponenten senkrecht zum Magnetfeld abgebildet werden. Von daher lässt sich die oben genannte Beziehung verwenden, um die auf die Bildebene projizierten Impulskomponenten zu berechnen.

Es gibt allerdings auch Spuren in der Blasenkammer, bei denen die Impulsbestimmung über den Krümmungsradius zu sehr ungenauen Ergebnissen führt. Je größer der Krümmungsradius (also je geringer die Krümmung) ist, desto ungenauer wird die Bestimmung. Wenn die Spur aber innerhalb der Blasenkammer endet, so steht eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Impulses zur Verfügung:

Durchquert ein Teilchen die Blasenkammer, so gibt es dabei unter anderem durch Ionisation Energie an seine Umgebung, die Kammerflüssigkeit, ab. Somit lässt sich die Reichweite R über die Energie-Verlust-Beziehung bestimmen:

$$R = - \int \frac{dE}{dE/dx}$$

(vgl. Seul 2009, S.10). Der Zusammenhang zwischen der Reichweite eines Teilchens und seinem Impuls ist in Abbildung 2.7 für verschiedene Teilchen dargestellt. Diese Grafik erhält man durch einen aufwändigen Iterationsprozess auf Grundlage der oben genannten Gleichung (siehe hierzu Seul 2009). Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen erfordern aber keinen Umgang mit diesem Diagramm. Wird ein Impuls eines Teilchens aus seiner Reichweite in der Blasenkammer berechnet, so erfolgt dies als Black-box. Das bedeutet, dass die Reichweite des Teilchens ($\hat{=}$ Länge der Spur) ermittelt wird. Wird die Länge der Spur von den Schülern richtig ermittelt, so wird auf dem digitalen Arbeitsblatt der entsprechende Impuls automatisch angegeben. In dem digitalen Arbeitsblatt ist nur die Reichweite eines Protons zu ermitteln, daher gibt das Arbeitsblatt dann den zugehörigen Impuls aus.

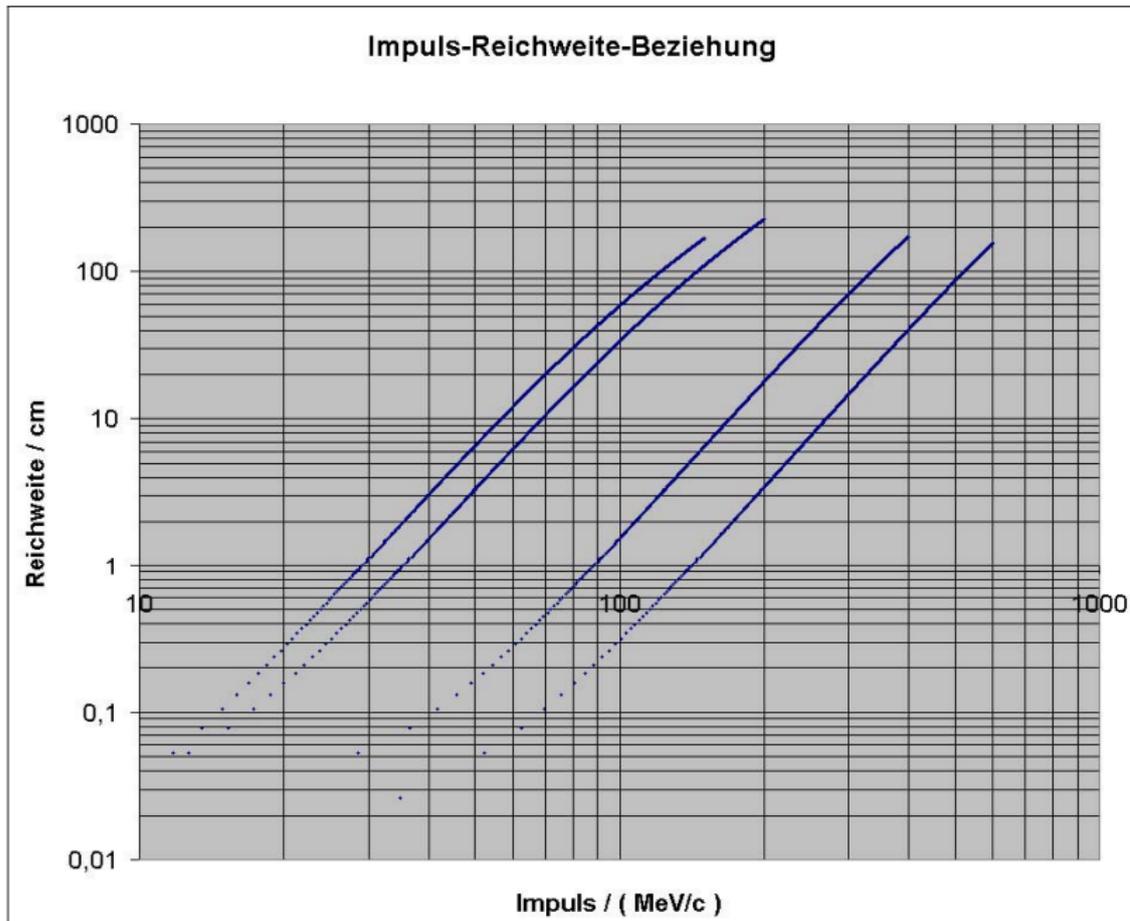


Abbildung 2.7: Impuls-Reichweite-Beziehung für (von links nach rechts) Myonen, Pionen, Kaonen und Protonen (Helzel 2002, S.63)

Sind die Impulse aller Teilchen bekannt, die sichtbare Spuren an einem Vertex¹⁴ hinterlassen haben, so kann über den Impulserhaltungssatz bestimmt werden, ob an der entsprechenden Wechselwirkung bzw. Umwandlung auch ein elektrisch neutrales Teilchen beteiligt war. Elektrisch neutrale Teilchen hinterlassen in der Blasenkammer keine Spuren (siehe Kapitel 2.2.3). Hierbei ist zu beachten, dass die Impulse der Teilchen vektoriell addiert werden müssen. Dies erfolgt im Rahmen der Aufgaben dieser Arbeit nur graphisch mithilfe des Programms GeoGebra. Die Impulssumme der sich vom Vertex wegbewegenden Teilchen muss dem Impuls des sich zum Vertex hinbewegenden Teilchens gleichen. Ist dies nicht der Fall, so ist an dem Prozess am Vertex auch (mindestens) ein elektrisch neutrales Teilchen beteiligt, welches keine Spur auf den Aufnahmen hinterlassen hat. Die Impulsdifferenz entspricht dem Impuls des elektrisch neutralen Teilchens. Bei der Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar entspricht die vektorielle Summe der Impulse der beiden Teilchen dem Impuls des Photons. In den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Blasenkammeraufnahmen bewegen sich die Strahlteilchen vom unteren zum oberen Bildrand.

Über den Impuls hinaus kann über die Blasendichte der Spur auch direkt die Geschwindigkeit

¹⁴Ein Vertex ist ein Wechselwirkungspunkt in der Blasenkammer (siehe Kapitel 2.2.3).

des Teilchens ermittelt werden (siehe Seul 2009, S.10). Sind der Impuls p und die Geschwindigkeit v eines Teilchens bekannt, kann über $m = p\sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1}$ die Masse m des Teilchens bestimmt werden, mit $\beta = \frac{v}{c}$. Diese Betrachtungen werden allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Zu Beginn des Einsatzes von Blasenkammern zu Forschungszwecken sind alle Auswertungen der Aufnahmen per Hand erfolgt. Da allerdings schnell sehr viele Bilder entstanden und die Auswertungen einen hohen Personalaufwand erforderten, sind Maschinen entwickelt worden, die die Auswertung erleichtern. Die erste erfolgreich eingesetzte Maschine konnte automatisch Spuren nachverfolgen und so vermessen. Diese Maschine (siehe Abbildung 2.8) ist von Jack V. Franck entwickelt worden und erhielt den Spitznamen „Franckenstein“, weil einer Legende zufolge der Physiker Arthur Rosenfeld beim ersten Anblick der Maschine so entsetzt von deren äußerem Erscheinungsbild gewesen sein soll, dass er sie als Monster bezeichnete.



Abbildung 2.8: Franckenstein (Alvarez 1968, S.262)

In der Folgezeit wurden auch Maschinen entwickelt, die automatisch interessante Spuren erkennen und auswerten konnten. Hierzu musste ihnen beigebracht werden, welche Art von Spuren zu dem jeweiligen Zeitpunkt gerade für die Wissenschaftler interessant waren.

Teilchenidentifikation

Blasenkammeraufnahmen können das Verständnis von Physik fördern: Auch wenn mit der Zeit Maschinen zur Spuridentifikation und -analyse entwickelt wurden, so ist doch ein eigenständiges Identifizieren der Spuren lohnenswert, um ein besseres Verständnis von Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen zu erlangen.

In diesem Abschnitt wird an exemplarischen Bildern die Identifikation von Teilchen in der

Blasenkammer erläutert. Die betrachteten Spuren sind zur besseren Sichtbarkeit farbig hervorgehoben, in der Originalaufnahme sind sie schwarz.

Es gibt sehr viele Teilchen, deren Spuren auf Blasenkammeraufnahmen identifiziert werden können. An dieser Stelle wird allerdings nur auf jene Spuren näher eingegangen, die für die Blasenkammeraufnahmen auf dem grundlegenden Anforderungsniveau benötigt werden.

Sichtbarkeit in der Blasenkammer

In der Blasenkammer sind nur die Spuren bewegter elektrisch geladener Teilchen sichtbar. Ein Teilchen aus der Kammerflüssigkeit wird daher erst sichtbar, wenn es durch die Wechselwirkung mit einem anderen Teilchen einen von Null verschiedenen Impuls erhält.

Sichtbarkeit von neutralen Teilchen

Elektrisch neutrale Teilchen selbst sind nicht in der Blasenkammer sichtbar, weil sie keine elektrische Ladung besitzen. Somit sind sie nicht in der Lage, Moleküle der Kammerflüssigkeit zu ionisieren und so zur Blasenbildung beizutragen. Die anderen Ladungen (schwache und starke Ladung, siehe Kapitel 2.1.2) spielen für die Sichtbarkeit in der Blasenkammer keine Rolle.

Elektrisch neutrale Teilchen können in der Blasenkammer jedoch indirekt beobachtet werden: Sobald sie sich in zwei (oder mehr Teilchen)¹⁵ mit elektrischer Ladung umwandeln, sind die Spuren der entsprechenden Teilchen sichtbar. Die Spuren dieser Teilchen scheinen dann „aus dem Nichts zu kommen“. Dieser Effekt tritt auch auf, wenn ein elektrisch neutrales Teilchen ein elektrisch geladenes Teilchen durch Wechselwirkung mit diesem aus der Kammerflüssigkeit herauslöst (siehe Abbildung 2.9).

Da aufgrund der Impulserhaltung aber in jedem Punkt die (vektorielle) Summe der Impulse aller Teilchen erhalten sein muss, können so elektrisch neutrale Teilchen indirekt beobachtet werden.

¹⁵Elektrisch neutrale Teilchen können sich aufgrund der Erhaltung der elektrischen Ladung nicht in ein einziges Teilchen mit von Null verschiedener elektrischer Ladung umwandeln. Wenn bei der Umwandlung eines elektrisch neutralen Teilchens elektrisch geladene Teilchen entstehen, dann entstehen diese immer paarweise.



Abbildung 2.9: Die Spur eines Protons ist hervorgehoben, sie scheint „aus dem Nichts zu kommen“. Das Proton ist durch ein elektrisch neutrales Teilchen (ein Neutron) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden.

Das Photon

Ein Photon selbst ist in der Blasenkammer nicht sichtbar, da es elektrisch neutral ist. Ein Photon kann aber indirekt beobachtet werden. Hierzu werden die Spuren der elektrisch geladenen Teilchen ausgewertet, die bei seiner Umwandlung oder Wechselwirkung entstehen.

Ein Photon kann sich z.B. in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln, dieser Fall ist auf Abbildung 2.10 sichtbar. Durch vektorielles Addieren der Impulse des Elektrons und des Positrons

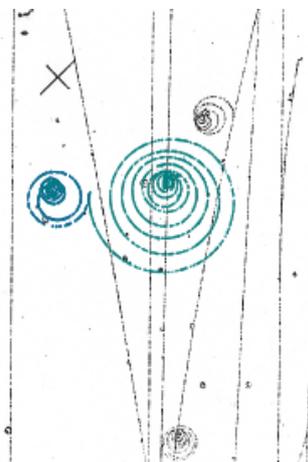


Abbildung 2.10: Die türkise hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron-Positron-Paar, das durch die Umwandlung eines Photons entstanden ist.

kann über die Impulserhaltung der Impuls des Photons berechnet werden (siehe Kapitel 2.2.3). Der Krümmungsradius der Spuren der Teilchen, die bei der Umwandlung eines Photons entstehen, hängt über die Formel $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ von deren Impuls ab. Auch wenn die Krümmungsradien unterschiedlich sind, kann es sich dennoch um ein Elektron-Positron-Paar handeln, da die beiden Teilchen nicht den gleichen Impuls erhalten müssen.

In dem in Abbildung 2.11 dargestellten Fall besaß das Positron einen größeren Impuls und

somit besitzt seine Spur auch einen größeren Krümmungsradius als die Spur des Elektrons. Die Spur des Positrons führt aus dem Bild hinaus.

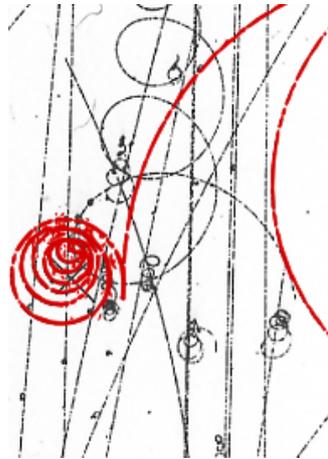


Abbildung 2.11: Die rot hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron-Positron-Paar, das durch die Umwandlung eines Photons entstanden ist.

Ein Photon kann auch mittels Compton-Streuung mit einem Elektron wechselwirken und so indirekt beobachtet werden. Dies ist in Abbildung 2.12 sichtbar.



Abbildung 2.12: Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron, welches durch Compton-Streuung, also durch ein Photon, aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Das Neutron

Ein Neutron ist in der Blasenkammer nicht sichtbar, da es elektrisch neutral ist. Ein Neutron kann aber indirekt beobachtet werden. Hierzu werden die Teilchen genutzt, die bei seiner Wechselwirkung mit anderen Teilchen entstehen.

Ein Neutron kann z.B. mit einem Proton aus der Kammerflüssigkeit wechselwirken. Dadurch wird das Proton aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst und erhält einen Impuls, sodass seine Spur in der Blasenkammer sichtbar wird. Dies ist in Abbildung 2.13 zu sehen.

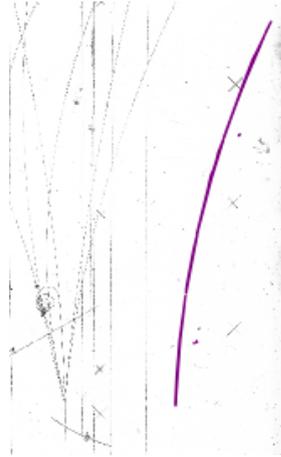


Abbildung 2.13: Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, das durch ein Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Der Begriff Vertex

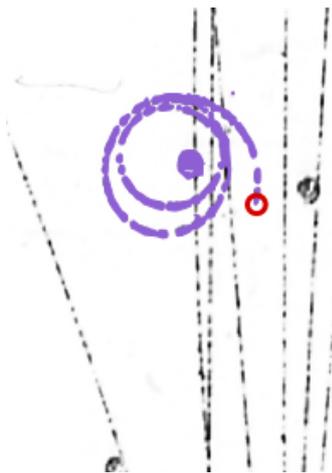


Abbildung 2.14: Der Vertex ist rot gekennzeichnet.

Ein Vertex ist ein Wechselwirkungspunkt (in der Blasenkammer). Die Strahlteilchen durchqueren die Blasenkammer und wechselwirken mit der Kammerflüssigkeit (Wasserstoff) z.B. durch Compton-Streuung. Dadurch kann ein Elektron der Kammerflüssigkeit genügend Energie erhalten, um das Wasserstoffatom zu verlassen, sodass es in der Blasenkammer sichtbar wird. Der Punkt, an dem die Wechselwirkung stattgefunden hat, ist auch der Punkt, an dem die Spur des Elektrons beginnt. Dieser Punkt wird als Wechselwirkungspunkt oder auch als Vertex bezeichnet.

Das Elektron

Auf Abbildung 2.15 ist die Spur eines Elektrons hervorgehoben. Elektronen befinden sich in der Flüssigkeit der Blasenkammer. Die Protonen als Strahlteilchen, die die Blasenkammer auf

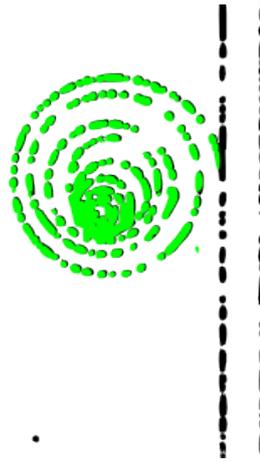


Abbildung 2.15: Die grün hervorgehobene Spur stammt von einem Elektron, das durch Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

allen Aufnahmen von unten nach oben durchqueren, können Elektronen aus den Molekülen der Kammerflüssigkeit herauslösen.

Die Blasenkammer ist von einem homogenen Magnetfeld umgeben, welches aus der Bildebene herausragt. Da die Elektronen bewegte Ladungsträger sind, wirkt auf sie die Lorentzkraft und ihre Spur ist nach links gekrümmt (Rechte-Hand-Regel).

Das Compton-Elektron



Abbildung 2.16: Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron, welches durch Compton-Streuung aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Elektronen können aber auch durch Compton-Streuung, also durch Wechselwirkung mit einem Photon, aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst werden.

In diesem Fall gibt es keine Spur, die zu dem Ursprungsvertex (Ursprungspunkt, s.u.) der Spirale hinführt, da Photonen keine Spur in der Blasenkammer hinterlassen.

Elektronen, die aufgrund von Compton-Streuung sichtbar sind, werden im Folgenden auch als Compton-Elektronen bezeichnet. In Abbildung 2.16 ist die Spur eines Compton-Elektrons hervorgehoben.

Das Proton

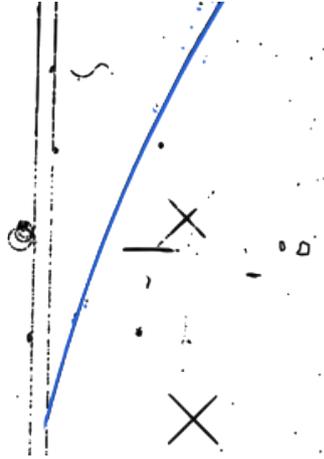


Abbildung 2.17: Die blau hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, das durch Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen (einem Proton) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Auf Abbildung 2.17 ist die Spur eines Protons hervorgehoben. Protonen befinden sich in der Kammerflüssigkeit der Blasenkammer. Die Strahlteilchen, die die Blasenkammer auf allen Bildern von unten nach oben durchqueren, können Protonen aus den Molekülen der Kammerflüssigkeit herauslösen.

Die Blasenkammer ist von einem homogenen Magnetfeld umgeben, welches aus der Bildebene herausragt. Da die Protonen bewegte Ladungsträger sind, wirkt auf sie die Lorentzkraft und ihre Spur ist nach rechts gekrümmt (Rechte-Hand-Regel).

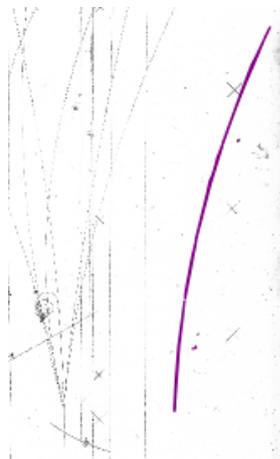


Abbildung 2.18: Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, welches durch Wechselwirkung mit einem Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Protonen können aber auch durch Wechselwirkung mit Neutronen aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst werden, wie auf Abbildung 2.18 zu sehen ist.

In diesem Fall gibt es keine Spur, die zu dem Ursprungsvortex (Ursprungspunkt) der Protonenspurs führt, da Neutronen keine Spur in der Blasenkammer hinterlassen.

Das Positron

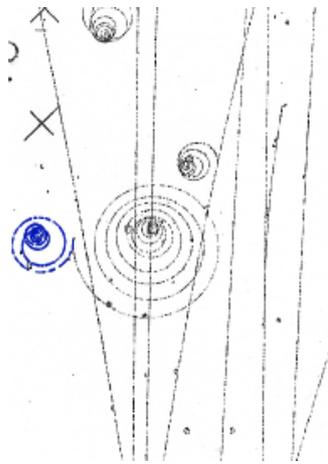


Abbildung 2.19: Die blau hervorgehobene Spur hinterließ ein Positron. Es ist Teil eines Elektron-Positron-Paares, das aus der Umwandlung eines Photons entstand.

Auf Abbildung 2.19 ist die Spur eines Positrons hervorgehoben. Positronen sind nicht in der Kammerflüssigkeit vorhanden, sie müssen also erst entstehen, bevor sie eine Spur hinterlassen können.

Positronen entstehen durch die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar. Da alle Ladungen, also auch die elektrische Ladung, erhalten sein müssen, kann ein Positron aus einem Photon nur als Teil eines Elektron-Positron-Paares entstehen. In diesem Fall gibt es keine Spur, die zu dem Ursprungsvortex (Ursprungspunkt) der Spirale hinführt, da Photonen keine Spuren in der Blasenkammer hinterlassen.

2.2.4 Grenzen der Blasenkammer

Die Erfindung der Blasenkammer durch Glaser war eine große Errungenschaft und brachte viele neue Erkenntnisse in der Teilchenphysik (siehe Kapitel 2.2.3). Doch die immer höheren

erreichbaren Teilchenenergien in den Beschleunigern machten die Blasenkammern als Detektoren für diese unbrauchbar.

Eine Blasenkammeraufnahme kann zu neuen Erkenntnissen, z.B. der Entdeckung neuer Teilchen, führen. Da eine Blasenkammer nicht sensibel auf eine bestimmte Art von Ereignissen eingestellt werden kann, werden im Hinblick auf eine bestimmte Art von Fragestellung ungefiltert auch die möglicherweise gerade nicht interessierenden Phänomene aufgenommen. Erst durch eine zusätzliche Analyse können die interessanten Aufnahmen herausgefiltert werden. Die Entdeckung des Ω^- war ein großer Erfolg der Blasenkammer. Aber schon bei dieser Entdeckung zeigte lediglich eines von 1000 Bildern ein Ω^- Teilchen. Eine der letzten großen Entdeckungen mit der Blasenkammer waren die schwachen neutralen Ströme. Allerdings zeigten hier von 1,4 Millionen Aufnahmen lediglich 3 das erhoffte Bild (vgl. Bleck-Neuhaus 2010, S.529 und Berger 2002, S.256).

Da für eine Bekräftigung der Theorie der Existenz von neuen Teilchen eine entsprechende Statistik, also eine große Anzahl von nachgewiesenen Ereignissen, erforderlich ist, müssen hierfür sehr viele Blasenkammeraufnahmen ausgewertet werden, wenn die entsprechenden Ereignisse nur selten auf ihnen zu finden sind. Das manuelle Auswerten von Blasenkammeraufnahmen kostet daher viel Zeit und Personal.

Doch der Einsatz von Blasenkammern wird mit fortschreitender Forschung nicht nur immer zeitaufwändiger, sondern es gibt auch Grenzen, an die der Detektor stößt, mit der Folge, dass die mit dieser Technik ermittelten Daten nicht mehr den Anforderungen genügen. So sind selbst Kammern mit fünf Metern Durchmesser nicht groß genug, damit die Teilchen, die bei Wechselwirkungen von Kammerflüssigkeit und Strahlteilchen in der Blasenkammer entstehen, vollständig in der Blasenkammer abgebremst werden können, wenn die Energie der Strahlteilchen 100 GeV übersteigt. Wird jedoch nicht die ganze kinetische Energie der Teilchen in der Blasenkammer abgegeben, kann der Impuls nicht über die Reichweite bestimmt werden. Die betreffenden Teilchen besitzen aber gleichzeitig eine derart hohe Geschwindigkeit, dass ihre Spurkrümmung zur genauen Radiusbestimmung zu gering ist. Daher kann über die Spuren dieser Teilchen keine Impulsbetrachtung durchgeführt werden und die Blasenkammer kann ihren eigentlichen Zweck als Detektor nicht erfüllen. Durch eine höhere Magnetfeldstärke könnte zwar eine stärkere Spurkrümmung erreicht werden, aber durch technische Gegebenheiten ist die erreichbare Magnetfeldstärke begrenzt (vgl. Kleinknecht 2005, S.85).

2.2.5 Blasenkammereinsatz heute

Zunächst schien es so, als sei die Ära der Blasenkammer mit dem Einsatz von modernen Detektorsystemen an Großbeschleunigern zu Ende gegangen. Danach blieb ihr vorerst nur der Verdienst, viele neue Erkenntnisse in der Teilchenphysik ermöglicht zu haben (siehe Kapitel 2.2.3). Ihre Aufnahmen werden allerdings bis heute weiterhin in der universitären Ausbildung im Rahmen von Physikpraktika genutzt, weil sie einen hohen Grad der Anschaulichkeit besit-

zen.

Vor einigen Jahren sind die Blasenkamern aber wieder aus ihrem Dornröschenschlaf erwacht, auch wenn sie heute nicht mehr im Zentrum wissenschaftlichen Interesses stehen.

Seit 2010 wird am SNOLAB in Kanada eine Meile unter der Erde eine Blasenkammer zur Suche nach Dunkler Materie in Form von WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) eingesetzt. Der Versuchsort unter der Erde dient der Abschirmung von Teilchen, die unerwünschte Störeffekte hervorrufen könnten. Die Auswerteelektronik an der Blasenkammer ist in der Lage, zu unterscheiden, ob die registrierten Ereignisse von „sichtbarer“ Materie oder von WIMPs hervorgerufen werden. Diese Unterscheidung erfolgt unter anderem über das akustische Signal, das die jeweilige Blase verursacht. So kann z.B. zwischen kurzen Spuren von α -Strahlung und von Dunkler Materie unterschieden werden. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ist die Blasenkammeraufnahme selbst, da WIMPs nur eine Blase hinterlassen, „gewöhnliche“ Materie (meist) mehrere (Siehe Abbildung 2.20). Da von Dunkler Materie hervorgerufene Ereignisse sehr selten sind, ist noch eine lange Laufzeit dieses Experimentes geplant (vgl. Fermilab 2010).

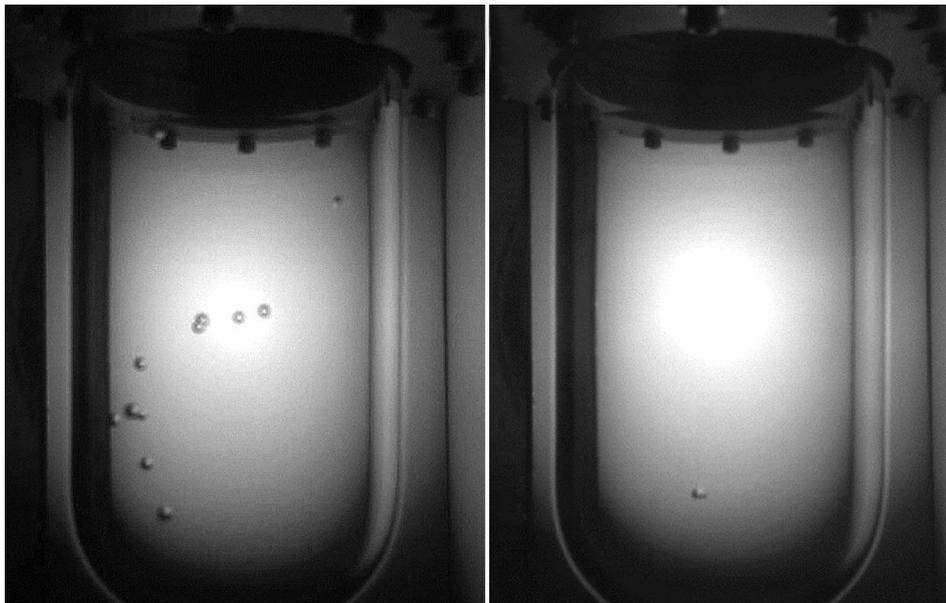


Abbildung 2.20: Blasenkammeraufnahmen der am SNOLAB eingesetzten Blasenkammer, links: „gewöhnliche Spur“, rechts: einzelne Blase, Hinweis auf ein WIMP (https://www.snolab.ca/sites/default/files/couppbubble_large.jpg 2015)

3 Didaktische Überlegungen zu den Unterrichtsmaterialien

In diesem Kapitel werden didaktische Überlegungen zu verschiedenen Aspekten der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Unterrichtsmaterialien erläutert. Zunächst wird der Einsatz von Medien im Unterricht behandelt, anschließend folgt jeweils ein Unterkapitel zur Motivation und zur Einordnung in die Curricula. Dieses Kapitel schließt mit einer Betrachtung zur Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Blasenkammeraufnahmen in der Schule.

3.1 Medien im Unterricht

Die im Rahmen dieser Arbeit für den Unterricht verwendeten Medien sind zum einen die Blasenkammerbilder an sich und zum anderen die mit GeoGebra (siehe Kapitel 3.1.2) erstellten Einführungsmaterialien und digitalen Arbeitsblätter sowie die begleitenden analogen Arbeitsblätter.

Medien können z.B. danach unterschieden werden, welchen Informationskanal sie ansprechen, welchen Abstraktionsgrad sie verlangen und welche Symbolsysteme sie verwenden. Letztendlich ist aber die Art des Einsatzes im Unterricht entscheidend für den Lernerfolg (vgl. Hopf, Wiesner und Schecker 2011, S. 115). Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien sind rein visuelle Medien, die Symbolisierungen durch Bilder und Schrift verwenden. Der erforderliche Abstraktionsgrad ist je nach Arbeitsblatt unterschiedlich (siehe Kapitel 4.5). In Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten der Materialien im Unterricht werden in Kapitel 4 Hinweise gegeben.

Medien können für vielfältige Zwecke eingesetzt werden (vgl. Hopf, Wiesner und Schecker 2011, S.115 und Kircher 2009, S. 206). Im Fall der Materialien zum Aufbau, der Funktionsweise und der Auswertung von Aufnahmen einer Blasenkammer dienen sie vor allem der Information (siehe Kapitel 4.4), der Visualisierung von Vorgängen in der Blasenkammer und der Rückmeldung zur Richtigkeit von Antwortmöglichkeiten. Diese Rückmeldung erfolgt über eine in die digitalen Arbeitsblätter eingebaute Feedbackfunktion sowie über die Möglichkeit der Selbstkontrolle mit den zu jeder Aufgabe vorhandenen analogen Lösungen. Durch den interaktiven Charakter der erstellten Materialien wird eine Rückmeldung erst ermöglicht, da die Schüler in den digitalen Arbeitsblättern Konstruktionen erarbeiten und Lösungen eingeben können.

Die eben erwähnte Informationsfunktion soll den Schülern die Arbeit mit den Materialien zur Blasenkammer erleichtern, da sie sich vorher mit den technischen Gegebenheiten von GeoGebra vertraut machen und Grundlagen zur Blasenkammer erarbeiten können. Dies ist vor allem dafür wichtig, dass sie mit den erarbeiteten Materialien zur Blasenkammer erfolgreich lernen können (vgl. Kircher 2009, S.643).

3.1.1 Einsatz von Bildern

Der Kern dieser Arbeit stellt die Aufbereitung von Blasenkammerbildern für den Einsatz in der Schule dar. In der Fachdidaktik wird zwischen Abbildungen, analogen Bildern und logischen Bildern unterschieden. Die Blasenkammerbilder sind den Abbildungen zuzuordnen, da sie die äußerlich sichtbaren Gegebenheiten darstellen (vgl. Hopf, Wiesner und Schecker 2011, S.116), und zwar die Spuren, die die Teilchen in der Blasenkammer hinterlassen.

Die Blasenkammerbilder stellen in diesem Zusammenhang eine Möglichkeit dar, den Schülern Zugang zur Analyse von Prozessen der Teilchenphysik zu gewähren, welchen sie ohne den Einsatz des gewählten Mediums nicht hätten. Es wird somit ein direkter Bezug zu Instrumenten hergestellt, die auch Wissenschaftler verwendet haben. Dies ist eine besondere Stärke von Medien (vgl. Kircher 2009, S.652) und kann motivierend wirken (siehe Kapitel 3.2).

Die im Unterricht eingesetzten Medien müssen den Schülern jedoch auch gerecht werden. Dies bedeutet u.a., dass das Kurzzeitgedächtnis nicht überfordert werden darf und deshalb die zu vermittelnden Informationen so ausgewählt werden müssen, dass eine Konzentration auf die wesentlichen Inhalte möglich ist (vgl. Kircher 2009, S.214). Da diese Arbeit Materialien zum Aufbau, der Funktionsweise und der Auswertung von Aufnahmen einer Blasenkammer auf grundlegendem Anforderungsniveau umfasst, wurden ganz bestimmte elementare Prozesse in der Blasenkammer ausgewählt, die den Schülern näher gebracht werden (siehe Kapitel 4.4.1). Nur diese Prozesse werden dann auch in den Aufgaben der Arbeitsblätter thematisiert. Wird nach dem Prozess an einem bestimmten Vertex gefragt, so werden die den Schülern vertrauten Prozesse als Antworten zu einer *Multiple-Choice*-Aufgabe angeboten¹. Weiterhin erhalten die Schüler eine Übersicht über diese Prozesse bzw. erstellen sie selbst (siehe Anhang C.2 bzw. D.2), sodass sie beim Bearbeiten der Aufgaben darauf zurückgreifen können und nicht alle Prozesse im Kurzzeitgedächtnis ständig präsent sein müssen.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist, dass Schüler nicht automatisch sämtliche relevanten Informationen aufnehmen (vgl. Kircher 2009, S.214). In dieser Hinsicht können die Schüler durch das Hervorheben wichtiger Elemente unterstützt werden. Deshalb sind die Blasenkammeraufnahmen für die digitalen Arbeitsblätter so aufbereitet worden, dass die betrachteten

¹Dies bezieht sich nur auf die Arbeitsblätter, die sowohl digital als auch analog bearbeitet werden sollen. Die beiden Arbeitsblätter, dessen vollständige Bearbeitung auch analog möglich ist, beinhalten keine *Multiple-Choice*-Fragen.

Spuren farbig hervorgehoben sind (siehe Abbildung 3.1).

Dabei ist es allerdings wichtig, den Schülern zu vergegenwärtigen, dass die Spuren in der Blasenkammer keineswegs farbig sind, sondern dass die Hervorhebung lediglich der besseren Sichtbarkeit dient. Weiterhin sind die Blasenkammeraufnahmen insofern bearbeitet worden, dass alle Spuren deutlicher zu sehen sind. Da dies allerdings nichts an dem eigentlichen Bild ändert, wird in den Einführungsmaterialien für die Schüler nicht näher darauf eingegangen.



Abbildung 3.1: Ausschnitt einer Blasenkammeraufnahme: links ist der unbearbeitete Ausschnitt zu sehen und rechts ist die Spur eines Elektron-Positron-Paares rot hervorgehoben

3.1.2 Digitale Medien

Die Aufbereitung der Blasenkammerbilder selbst ist bereits im vorangegangenen Kapitel thematisiert worden. Die Blasenkammerbilder wurden jedoch nicht nur für sich aufbereitet, sondern darüber hinaus auch in die mit GeoGebra erstellten digitalen Arbeitsblätter eingebettet. Dadurch ist eine Nähe von Bild und Text in Form von Aufgabenstellungen, Tipps und Antwortmöglichkeiten möglich, was dem räumlichen Kontiguitätsprinzip entspricht. Dies entlastet die Schüler und erleichtert so das Lernen. Die Auswahl der eben erwähnten Tipps auf den digitalen Arbeitsblättern ist bei *Multiple-Choice*-Aufgaben nach einer falschen Antwort und bei Rechen- und Konstruktionsaufgaben von vornherein möglich. Diese Hilfestellungen unterstützen ein frustfreies Lernen, bei dem das Selbstkonzept gestärkt wird (vgl. Hopf, Wiesner und Schecker 2011, S.121).

Die digitalen Arbeitsblätter sind als Übungsprogramme zu klassifizieren, da sie zu den gestellten Aufgaben eine Antworteingabe ermöglichen und ein *Feedback* zur Korrektheit der Antwort ausgeben (vgl. Hopf, Wiesner und Schecker 2011, S.121). Weiterhin stellen sie eine Form von *E-Learning* dar, da sie interaktiv bearbeitet und Lehrern und Schülern über das Internet zur Verfügung gestellt werden (vgl. Kircher 2009, S.442). Hierbei sollten Transfer- und Reproduktionsaufgaben angeboten werden (vgl. Kircher 2009, S.442). Die erarbeiteten Materialien umfassen beide Arten von Aufgaben: die Reproduktionsaufgaben sind qualitative Aufgaben zur Identifizierung von Prozessen und zum Erkennen von Teilchenspuren, zu denen die notwendigen Grundlagen bereits in Vorbereitung auf die Aufgaben in der „Einführung in die Blasenkammer“ beschrieben werden (siehe Kapitel 4.4). Die Transferaufgaben finden sich vor allem in (halb-)quantitativen Aufgaben, weil hier Vorwissen übertragen werden muss, das

nicht aus anderen Teilen der Unterrichtsmaterialien übernommen werden kann.

Besonders wichtig für dauerhaftes Lernen ist es, dass neues Wissen mit bereits bekanntem Wissen verknüpft wird. Eine effektive Form stellt die Verknüpfung von Formel und Bild dar (vgl. Kircher 2009, S.215). In den Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen benötigen die Schüler unter anderem die Lorentzkraft als Vorwissen (siehe Kapitel 4.1). Zu dieser Formel wird den Schülern dann eine Anwendung geboten und sie sehen die Wirkung der Lorentzkraft in Form der Krümmung der Spuren der Teilchen auf den Bildern.

GeoGebra

GeoGebra ist eine dynamische Geometriesoftware², die für den Einsatz im Mathematikunterricht in der Schule entwickelt wurde. Sie bietet unter anderem Funktionen wie das Erstellen von Kreisen, Tangenten, Streckenzügen und ermöglicht das Auslesen von Radien, Längen und Richtungsvektoren. Diese Funktionen werden für die Auswertung der Blasenkammeraufnahmen benötigt. Die Benutzeroberfläche ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Da das Programm zum einen an Schulen sehr verbreitet, zum anderen intuitiv zu bedienen ist (vgl. Roger Erb 2015), wurde es als Basis für die digitalen Arbeitsblätter gewählt.

Da diese Arbeitsblätter *online* über *GeoGebra-Tube*³ zur Verfügung gestellt werden, können die Aufgaben direkt *online* bearbeitet werden und es ist nicht notwendig, dass das Programm an der Schule installiert ist.

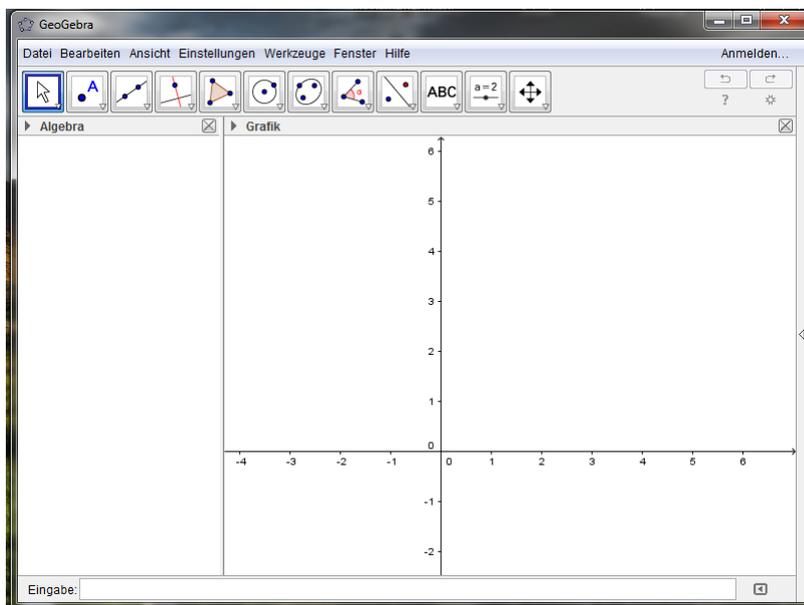


Abbildung 3.2: Die Benutzeroberfläche von GeoGebra

²<http://www.geogebra.org/>

³<https://tube.geogebra.org/>, die Links zu den Materialien befinden sich in Kapitel 4.5.3.

3.1.3 Arbeitsblätter

Im Rahmen dieser Arbeit sind sowohl digitale Arbeitsblätter in GeoGebra als auch analoge Arbeitsblätter erarbeitet worden. Die digitalen Arbeitsblätter können im Unterricht durch die analogen Arbeitsblätter ergänzt werden. Nach Kircher kann ein Arbeitsblatt informierend, vertiefend zur Erarbeitung oder kontrollierend zur Überprüfung des Wissens eingesetzt werden (vgl. Kircher 2009, S.230). Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Arbeitsblätter haben primär vertiefenden Charakter. Allerdings ist es auch möglich, jene analogen Arbeitsblätter, deren Bearbeitung auch ohne digitales Arbeitsblatt möglich ist, als Lernzielkontrolle einzusetzen (siehe Kapitel 4.6). Die analogen Arbeitsblätter dienen vor allem einer Strukturierung des Lernprozesses sowie einer Ergebnissicherung. Im Unterschied zu den digitalen Arbeitsblättern werden zu den *Multiple-Choice*-Aufgaben sowie zu den Rechenaufgaben zudem Begründungen bzw. die Darlegung des Lösungswegs verlangt, sodass die Schüler vor allem die *Multiple-Choice*-Aufgaben nicht durch Raten oder Ausprobieren bearbeiten, ohne ihr physikalisches Verständnis zu bemühen.

3.2 Motivation und Interesse

Die bereits beschriebene Interaktivität der Materialien kann die Motivation der Schüler fördern, denn sie erhalten so selbst einen größeren Bezug zu den Lerninhalten (vgl. Kircher 2009, S.426). Außerdem bedingt sie einen abwechslungsreichen Unterricht. Für eine dauerhafte Motivation ist darüber hinaus von zentraler Bedeutung, dass die Inhalte bei den Schülern auf Interesse stoßen und ansprechend gestaltet sind.

Besonders interessant sind Inhalte für Schüler, wenn diese für sie persönlich relevant sind (vgl. Elster 2007). Des Weiteren sind Schüler empirischen Untersuchungen zufolge an dem Verständnis von wissenschaftlichen und technologischen Neuerungen sowie an der realen Forschung von Wissenschaftlern interessiert (vgl. Peter Häußler 2000, S.693 und Rugemer 2007, S.8). Die Bedeutung der Teilchenphysik und ihrer Forschungsergebnisse hat nicht zuletzt durch die Verleihung verschiedener Physik-Nobelpreise in den Jahren 1999, 2002, 2004 und 2013 (Nachweis des Higgs-Teilchens) und durch die (Wieder-)Inbetriebnahme des LHC am CERN in den Jahren 2008 und aktuell 2015 sowie die begleitende Berichterstattung in den verschiedenen Medien Eingang ins Bewusstsein der Menschen gefunden. Die Behandlung teilchenphysikalischer Grundlagen im Unterricht kann auch deshalb Interesse bei den Schülern hervorrufen, weil sie Basis sämtlicher Lebensvorgänge sind. Allerdings muss den Schülern dieser Zusammenhang unter Umständen erst aufgezeigt werden, indem Anwendungsbeispiele der fundamentalen Wechselwirkungen im Alltag und in der Natur erläutert werden. So findet z.B. die Kernfusion in der Sonne u.a. aufgrund der schwachen Wechselwirkung (siehe Kapitel 2.1.1) statt. Der verhältnismäßig seltene Austausch von W -Bosonen ist dafür verantwortlich, dass die Sonne über einen langen Zeitraum hinweg eine annähernd gleichbleibende Energiemenge an ihre Umge-

bung abgibt. Somit ist die schwache Wechselwirkung mitverantwortlich dafür, dass überhaupt Leben auf der Erde möglich ist. Die Teilchenphysik beschäftigt sich mit der Frage, was die elementaren Bausteine der Materie sind und welche die physikalischen Grundgesetze sind. Sie stellt grundlegende Forschungsfragen, nach deren Antworten die Wissenschaftler an den großen Beschleunigeranlagen in Genf, Chicago und Hamburg suchen.

Verschiedenen empirischen Untersuchungen zum Physikinteresse von Schülern zufolge interessieren sich Mädchen und Jungen unter anderem für Phänome in der Natur, die die Physik bisher noch nicht erklären kann. Darüber hinaus sind insbesondere für Jungen neue Erfindungen und Entdeckungen interessant (vgl. Holstermann und Bögeholz 2007 und Elster 2007). Genau in diesem Bereich findet die Forschung der Teilchenphysik statt, z.B. bei der Erforschung dunkler Materie (siehe Kapitel 4.3.2).

Wichtig für die Motivation und das Interesse der Schüler ist, dass die Kontexte, in die die Lerninhalte eingebettet werden, eine Bedeutung für die Schüler besitzen. Ein solcher Kontext kann z.B. auch die „Bedeutung der Physik für Technik und Gesellschaft“ sein (vgl. *Piko-Briefe - Der Fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst*, S.24). In diesem Zusammenhang ist gleichzeitig darauf zu achten, dass der Kontext authentisch ist und nicht konstruiert wirkt. Der Kontext der Teilchenphysik selbst eignet sich also durchaus als Kontext für die Behandlung der Blasenkammer einschließlich der Auswertung von Blasenkammeraufnahmen. Zwar ist die Blasenkammer keine neue Erfindung mehr und wird nicht mehr als Detektor an den großen Beschleunigeranlagen eingesetzt, sie ist aber immer noch von wesentlich größerer Aktualität als die meisten der heute im Physikunterricht anzutreffenden Inhalte und Kontexte. So werden Blasenkammer seit einiger Zeit wieder in der Forschung eingesetzt (siehe Kapitel 2.2.5). Speziell wird in dieser Arbeit der historische Kontext der Blasenkammer als Kontext für die erstellten Materialien vorgeschlagen (siehe Kapitel 4.3).

Ein Kontext, der in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus von Physikdidaktikern rückte, ist der medizinische Kontext. So zeigen verschiedene empirische Studien, dass gerade Mädchen ein hohes Interesse an physikalischen Inhalten aufweisen, wenn diese in einen medizinischen Zusammenhang eingebettet sind (vgl. Holstermann und Bögeholz 2007, S.73 und Elster 2007, S.5). Dies liegt vor allem an der bereits erwähnten Bedeutung, die Schülerinnen in Bezug auf diesen Kontext für ihre Lebenswelt erkennen. Auch bei Jungen kann der medizinische Kontext interessensfördernd wirken (vgl. Müller 2007, S.66). Die beschriebene Beliebtheit des medizinischen Kontextes bei den Schülern lässt sich nur begrenzt für das Thema Blasenkammer nutzen. Da Blasenkammer oder Blasenkammerbilder an sich nicht in der Medizin eingesetzt werden, wäre ein Kontext als übergeordnete Sinneinheit sehr konstruiert und kann dann nicht mehr die Motivation und das Interesse fördern. Weil vor allem Mädchen aber unter anderem auch an der Therapie in der Medizin interessiert sind (vgl. *Piko-Briefe - Der Fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst*, S.10), wird in dieser Arbeit im Kapitel 4.3.1 eine Verbindung zwischen Blasenkammeraufnahmen und der Protonentherapie hergestellt, die als Anknüpfungspunkt im

Unterricht genutzt werden kann.

Das durch einen Kontext oder Anknüpfungspunkt hervorgerufene Interesse kann wieder stark zurückgehen, wenn quantitative Betrachtungen, verbunden mit Formeln und Rechnungen, zum Tragen kommen (vgl. Elster 2007, S.3). Dies gilt im Hinblick auf alle Kontexte bzw. Inhalte im Physikunterricht. Eine Brücke zwischen den qualitativen und den quantitativen Aufgaben können sogenannte halb-quantitative Aufgaben schaffen, welche z.B. mit Je-Desto-Aussagen arbeiten (vgl. *Piko-Briefe - Der Fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst*, S.83). Aufgrund dessen sind in die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Arbeitsblätter auch halbquantitative Aufgaben integriert, welche auch ohne Rechnung ein vertieftes Verständnis von physikalischen Zusammenhängen und Grundlagen fördern.

3.3 Einordnung in die Curricula

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien sollen bundeslandübergreifend eingesetzt werden können. Deswegen werden sie in diesem Abschnitt nicht in den Lehrplan eines bestimmten Bundeslandes eingeordnet. Stattdessen findet eine Einordnung in die Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss und in die Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur statt.

Der Einsatz der Materialien ist in der gymnasialen Oberstufe (im Grundkurs oder auch im Leistungskurs⁴ bzw. im Kurs mit grundlegendem Anforderungsniveau oder auch im Kurs mit erhöhtem Anforderungsniveau) aber auch im Rahmen von Projektunterricht möglich. In allen Fällen ist das benötigte Vorwissen zu beachten (siehe Kapitel 4.1).

3.3.1 Bildungsstandards

Die Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz gelten zwar für den mittleren Schulabschluss in der 10. Klasse, trotzdem lassen sich die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Unterrichtsmaterialien hierin einordnen, bzw. es lassen sich Anknüpfungspunkte herstellen. In der Einleitung des Dokumentes sind die Ziele naturwissenschaftlicher Bildung beschrieben. Sie soll den Schülern „eine aktive Teilhabe an gesellschaftlicher Kommunikation und Meinungsbildung über technische Entwicklung und naturwissenschaftliche Forschung“ ermöglichen und weiterhin die Phänomene der Physik zugänglich sowie die Geschichte derselben verständlich machen (Kultusministerkonferenz 2004a, S.6). Das Erreichen dieser Ziele kann durch die Materialien zur Blasenammer unterstützt werden, da sie den Schülern einen Einblick in einen Teilbereich der Forschung der Teilchenphysik bieten können und über den historischen Kontext gleichzeitig

⁴Für den Einsatz im Leistungskurs bzw. im Kurs mit erhöhtem Anforderungsniveau gibt es alternativ auch die Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau welche im Rahmen einer Masterarbeit mit dem Titel „Einsatz von Blasenammerbildern in der Schule auf erhöhtem Anforderungsniveau“ erstellt werden.

den Zugang zur Geschichte der (Teilchen-)Physik eröffnen können.

Einordnung in die Kompetenzbereiche

Die Bildungsstandards definieren die vier Kompetenzbereiche Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien zum Thema Blasenkammer lassen sich den ersten beiden Kompetenzbereichen zuordnen (vgl. Kultusministerkonferenz 2004a, S.7).

Fachwissen: Einordnung in die Basiskonzepte Der Kompetenzbereich Fachwissen ist wiederum in die vier Basiskonzepte Materie, Wechselwirkung, System und Energie untergliedert (vgl. Kultusministerkonferenz 2004a, S.7).

Dem Konzept Materie ist in Zusammenhang mit den Arbeitsmaterialien vor allem das Teilchenmodell zuzuordnen (vgl. Kultusministerkonferenz 2004a, S.8), über das Kenntnis seitens der Schüler benötigt wird, damit diese die Blasenkammeraufnahmen auswerten können.

Das Konzept Wechselwirkung beinhaltet die Wirkung zweier Körper bzw. Ladungen aufeinander. Weiter ausgeführt wird dies durch eine mögliche Bewegungsänderung des Körpers durch diese Wirkung (vgl. Kultusministerkonferenz 2004a, S.8 f.). Die Wechselwirkungen zweier Teilchen sind das zentrale Element, wodurch sich die in der Blasenkammer auftretenden Prozesse beschreiben lassen.

Damit diese Prozesse analysiert werden können, ist die Kenntnis von Erhaltungssätzen wie dem Impulserhaltungssatz wesentlich. Im Basiskonzept Energie ist der Energieerhaltungssatz enthalten (vgl. Kultusministerkonferenz 2004a, S.9), der jedoch in den Materialien zur Blasenkammer auf grundlegendem Anforderungsniveau nicht angewendet wird.

Das Basiskonzept System ist nicht Gegenstand der Arbeitsmaterialien.

Erkenntnisgewinnung Der Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung wird durch das Nutzen von Modellen und verschiedenen Untersuchungsmethoden charakterisiert. Dabei besteht der Prozess der Erkenntnisgewinnung aus Wahrnehmen, Ordnen, Erklären, Prüfen und Modelle bilden (vgl. Kultusministerkonferenz 2004a, S.7 und S.10).

Auf den Blasenkammeraufnahmen nehmen die Schüler zunächst verschiedene Spuren von Teilchen wahr. Durch Hervorheben der Spuren, die für die jeweilige Aufgabe relevant sind (siehe Kapitel 3.1.1), und die parallel sichtbaren Aufgabenstellungen wird die Wahrnehmung der Schüler auf die Problemstellung gelenkt.

Um die Aufgaben bearbeiten zu können, müssen die Schüler die sichtbaren Phänomene (z.B. Krümmungsrichtung der Spur) auf Bekanntes zurückführen (z.B. Wirkung der Lorentzkraft auf bewegte elektrisch geladene Teilchen im Magnetfeld) und damit ordnen.

Das Erklären wird immer auf den analogen Arbeitsblättern verlangt, sodass die Schüler ihre Antworten auf die Fragen auch begründen und somit zeigen müssen, dass sie in der Lage sind,

die Prozesse in der Blasenkammer in ihr physikalisches Wissen einzuordnen.

Das Prüfen erfolgt mittels Aufgaben, dessen Ergebnisse noch Interpretationsbedarf besitzen. So müssen die Schüler z.B. in einem Fall entscheiden, ob an einem bestimmten Prozess in der Blasenkammer auch ein elektrisch neutrales Teilchen beteiligt war⁵.

Das Modellbilden ist nicht explizit in den Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen enthalten.

3.3.2 Einheitliche Prüfungsanforderungen für das Abitur

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien stellen zwar keine Abituraufgaben dar, in den Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur (EPA) wird aber definiert, was die Schüler zum Zeitpunkt der Abiturprüfung können sollen. Diese Fähigkeiten müssen sie in der Zeit vor dem Abitur erwerben, in welcher auch die Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen zum Einsatz kommen können.

Auch in den EPA gibt es vier Kompetenzbereiche: Fachkenntnisse, Fachmethoden, Kommunikation und Reflexion (vgl. Kultusministerkonferenz 2004b, S.3 f.). Sie entsprechen in etwa den Kompetenzbereichen der Bildungsstandards, weshalb die Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen wieder in die ersten beiden Kompetenzbereiche Fachkenntnisse und Fachmethoden einzuordnen sind. Die Kompetenzbereiche der EPA sind allerdings umfangreicher, da sie für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife und nicht für den mittleren Bildungsabschluss gelten.

Kompetenzbereich Fachkenntnisse

Gegenstand des Kompetenzbereiches Fachkenntnisse sind Erhaltungssätze. Da dies nicht, wie bei den Bildungsstandards, auf den Energieerhaltungssatz beschränkt ist, sind hier auch die für diese Unterrichtsmaterialien wesentlichen Erhaltungssätze für den Impuls und die elektrische Ladung⁶ mit eingeschlossen. Weiterhin sind in diesen Kompetenzbereich historische Erkenntnisse in der Physik eingeschlossen (vgl. Kultusministerkonferenz 2004b, S.3). Das entspricht dem für die erstellten Unterrichtsmaterialien vorgeschlagenen Kontext (siehe Kapitel 4.3).

Kompetenzbereich Fachmethoden

Der Teil des Kompetenzbereiches Fachmethoden, der für die Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen relevant ist, entspricht im Wesentlichen dem Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung der Bildungsstandards (siehe Kapitel 3.3.1).

⁵Elektrisch neutrale Teilchen hinterlassen in der Blasenkammer keine Spuren. Daher kann nur mithilfe von Erhaltungssätzen auf ihre Existenz geschlossen werden.

⁶Die Erhaltung der elektrischen Ladung ist z.B. wichtig um den Schülern plausibel zu machen, weshalb bei der Umwandlung eines Photons kein einzelnes Positron entstehen kann, sondern warum ein Positron immer gemeinsam mit einem Elektron entsteht.

Fachliche Inhalte

In den Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur sind auch die fachlichen Inhalte beschrieben, welche die Schüler bis zu der Prüfung beherrschen sollten.

Demnach sollen sich die Schüler den Lehrplänen entsprechend mit „Felder[n], Wellen, Quanten und Materie auskennen“ (Kultusministerkonferenz 2004b, S.4). Dabei sind unter anderem Grundlagen zu magnetischen Feldern, Naturkonstanten, Wechselwirkungen der Felder mit Materie und zu Kräften verlangt (vgl. Kultusministerkonferenz 2004b, S.4). Diese Grundlagen werden auch in den Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen vertieft. Das Magnetfeld in der Blasenkammer bewirkt über die Lorentzkraft die Krümmung der Spuren und ermöglicht so einen Rückschluss auf den Impuls des Teilchens, von dem die Spur stammt. Die Naturkonstanten, die für die Aufgaben relevant sind, sind die Lichtgeschwindigkeit c und die Elementarladung e , weil z.B. der Impuls in Einheiten von $\frac{\text{GeV}}{c}$ angegeben wird. Die Kenntnis der verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Teilchen ist notwendig, um die Prozesse in der Blasenkammer auswerten zu können (siehe Kapitel 2.2.3).

Weiterhin werden in den EPA Kenntnisse zu der Struktur der Materie für die Abiturprüfung vorausgesetzt. So sollen die Schüler unter anderem mit Konzepten wie Atomen, Kernen und (ausgewählten) Elementarteilchen sowie Detektoren vertraut sein (vgl. Kultusministerkonferenz 2004b, S.5). Die Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen sind geeignet, das Erreichen dieses Ziels zu unterstützen, da die Blasenkammer ein Detektor für Elementarteilchen ist und die Teilchen selbst sowie Wasserstoffkerne und -atome behandelt werden.

In Grundkursen bzw. Kursen mit grundlegendem Anforderungsniveau soll „die Vermittlung einer wissenschaftspropädeutisch orientierten Grundbildung“ (Kultusministerkonferenz 2004b, S.5) angestrebt werden. Weil die Blasenkammeraufnahmen durch ihre visuelle Darstellung einen leichten Zugang zu Prozessen der Teilchenphysik ermöglichen (siehe Kapitel 3.4), eignen sich diese, um einen Einblick in Experimente und Apparaturen zu erlangen, mit welchen Wissenschaftler neue Erkenntnisse gewonnen haben.

3.4 Einsatz von Blasenkammeraufnahmen

Bisher ist der Einsatz von Blasenkammeraufnahmen noch nicht in den Lehrplänen der verschiedenen Bundesländer verankert. Dieser Abschnitt soll verständlich machen, warum die Aufnahmen sich gut eignen, um den Schülern zu einem Zugang zur Teilchenphysik zu verhelfen. Verschiedene Medien, wie z.B. Tageszeitungen oder Online-Nachrichtendienste, berichten immer wieder von den aktuellsten Ergebnissen und Erkenntnissen physikalischer Forschung. Allerdings erreichen diese Errungenschaften die Öffentlichkeit trotz entsprechender Berichterstattung nicht immer wie gewünscht (vgl. Weisskopf 1990, S.74). Dies liegt unter anderem daran, dass Laien die physikalischen und mathematischen Grundlagen fehlen, um ein Verständnis z.B. des Higgs-Mechanismus möglich zu machen. Dadurch bleibt der Kern der Sache

diesen Menschen verborgen und Physiker erscheinen mehr als alltagsfremd denn als zugängliche Wissenschaftler. Durch ein adäquates Vermitteln physikalischer Sachverhalte kann diesem Umstand Abhilfe geleistet werden (vgl. Weisskopf 1990, S.73). So hilft einem Laien die Aufklärung über die Zusammensetzung der elektrischen Ladungszahl eines Protons aus den elektrischen Ladungszahlen von zwei *Up*-Quarks und einem *Down*-Quark oft nur wenig, da diese Rechenaufgaben keinen Zugang öffnen können (vgl. Weisskopf 1990, S.76). Blasenkammeraufnahmen sind viel anschaulicher, um etwas über die Eigenschaften von (Elementar-)Teilchen zu lernen, denn hier sind die Spuren der Teilchen direkt sichtbar.

Ein weiteres Problem mit der Vermittlung von Erkenntnissen aus der aktuellen Forschung ist, dass die moderne Physik oftmals nicht mehr Alltagsphänomene, oder sogar noch nicht einmal Zusammenhänge in der Natur auf der Erde, sondern Vorgänge im Kosmos erforscht (vgl. Weisskopf 1990, S.76). Weißkopf plädiert dafür, nicht nur die ganz neuen Forschungsergebnisse und Theorien, sondern vor allem auch deren Grundlagen zu vermitteln, „weil sie es sind, die den geistigen Wert der modernen Wissenschaft enthalten“ (vgl. Weisskopf 1990, S.73).

Weiterhin nennt er die Errungenschaften der Naturwissenschaften ein positives Kulturgut des letzten Jahrhunderts und sagt in diesem Zusammenhang auch, dass es wichtig sei, der Öffentlichkeit plausibel zu machen, warum aktuelle Forschung wie z.B. die Beschleunigerringe so teuer sind. Als weiteren Punkt spricht er an, dass Erkenntnisse über die Natur die Menschen der Natur näher bringen sollen (vgl. Weisskopf 1990, S.74 und S.76). Hier kommt die Teilchenphysik ins Spiel, denn Teilchenphysiker befassen sich mit der Erklärung der fundamentalen Prozesse im Universum und damit, woraus das Universum und somit auch wir selbst zusammengesetzt sind (vgl. Jones 1994, S.470). Es gibt bereits Materialien, die Schülern bestimmte Aspekte der Teilchenphysik näher bringen sollen. So bietet z.B. das Netzwerk Teilchenwelt sogenannte *Masterclasses* an, in welchen Schüler unter anderem Originaldaten des ATLAS Experimentes auswerten können. Da stellt sich die Frage, weshalb es trotzdem Sinn ergibt, parallel dazu Aufgaben zu Blasenkammeraufnahmen zu erstellen, obwohl heute kaum noch Blasenkammern im Einsatz sind.

Blasenkammeraufnahmen haben den großen Vorteil, dass sie sehr leicht zugänglich sind. So kann ein Laie innerhalb von fünf Minuten erste selbstständige Erkenntnisse aus den sichtbaren Spuren ziehen und somit begreifen, dass die Teilchenphysik auf realen Vorgängen beruht. Dieser Effekt kann nicht in der gleichen Weise durch Computersimulationen hervorgerufen werden, wie sie bei modernen Experimenten zum Einsatz kommen (vgl. Jones 1994, S.468).

Auf einer Blasenkammeraufnahme ist es möglich, Prozesse zu beobachten, die innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde ablaufen. Die spiralförmigen Spuren, welche von Elektronen oder Positronen stammen, sind einfach zu identifizieren und es ist leicht, plausibel zu machen, warum die Spurkrümmung im Verlauf immer stärker wird⁷ (siehe Abbildung 3.3). Auch die Ladungserhaltung kann auf den Aufnahmen leicht diskutiert werden (vgl. Jones 1994, S.468). Weiterhin

⁷Die Teilchen hinterlassen Spuren, da sie Moleküle der Kammerflüssigkeit ionisieren. Dadurch geben sie (kinetische) Energie ab und werden langsamer, wodurch sich die immer stärkere Krümmung erklären lässt.

sind drei Parameter der Spuren in der Blaskammer direkt beobachtbar: die Blasendichte, die Krümmung der Spur sowie deren Reichweite⁸. Diese drei Parameter lassen Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit, den Impuls und die kinetische Energie des Teilchens zu, von dem die Spur stammt. Auch der Compton-Effekt ist in der Blaskammer beobachtbar (siehe Abbildung 3.4). Ein weiteres spannendes Thema, welches in den Medien und auch in der Literatur aufgegriffen wurde, ist die Anti-Materie. Sie erschien in diesen Zusammenhängen immer mysteriös und gefährlich. Auf Blaskammeraufnahmen sind aber Spuren von Positronen sichtbar (siehe Abbildung 3.3, die nach rechts gekrümmte Spur stammt von einem Positron). Anhand dieser Positronen ist erkennbar, dass Anti-Materie sich genauso „normal“ verhält wie gewöhnliche Materie. Die Positronen entstehen in der Blaskammer zusammen mit Elektronen bei der Umwandlung eines Photons. Dieser Prozess kann auch beim Verständnis des Welle-Teilchen-Dualismus von Licht behilflich sein, da hier deutlich wird, dass Photonen sich wie (alle anderen) Teilchen in der Blaskammer verhalten (vgl. Jones 1994, S.469).

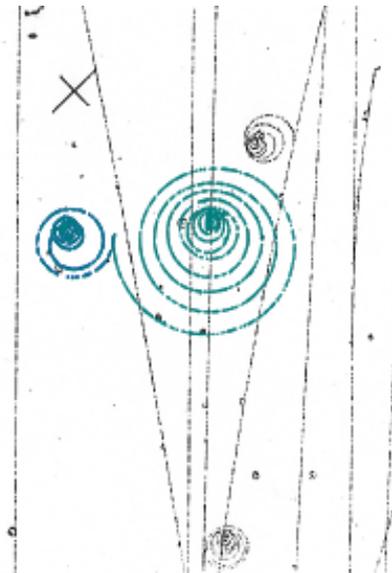


Abbildung 3.3: Die Spur eines Elektron-Positron-Paars ist türkisen hervorgehoben



Abbildung 3.4: Compton-Streuung auf einer Blaskammeraufnahme: violett hervorgehoben ist die Spur des Elektrons

⁸Die Reichweite einer Spur entspricht ihrer Länge. Diese ist natürlich nur beobachtbar, wenn die Spur innerhalb der Blaskammer endet.

4 Die Unterrichtsmaterialien

Dieses Kapitel stellt die Unterrichtsmaterialien zum Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau vor. Dieses Kapitel beinhaltet den möglichen Ablauf einer Einheit zu Blasenkammern im Unterricht sowie als Schwerpunkt der Arbeit die Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen. Zunächst werden die Lernziele und Lernvoraussetzungen im gleichnamigen Kapitel vorgestellt. Anschließend werden die technischen Voraussetzungen genannt. Die nächsten Kapitel sind chronologisch nach dem Unterrichtsverlauf angeordnet. Im Kapitel „Einstieg“ wird der historische Kontext für Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen kurz vorgestellt. Zusätzlich wird eine Verknüpfung zur Medizin sowie zu weiteren Bereichen wie Kunst oder Musik hergestellt. Im Abschnitt „Erarbeitung von Grundlagenwissen“ werden die Materialien vorgestellt, die den Schülern ein möglichst hindernisfreies Lernen mit den Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen ermöglichen sollen. Die Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen werden im gleichnamigen Kapitel vorgestellt. Hierzu werden der Aufbau der Materialien und deren Schwierigkeitsabstufungen sowie die Einsatzmöglichkeiten erläutert. Darauf folgt eine Übersicht über die einzelnen Aufgabenblätter mit einer Erläuterung der mit dem jeweiligen Arbeitsblatt erreichbaren Ziele. Abschließend gibt es einen Hinweis zu möglichen Lernzielkontrollen.

Das gesamte Kapitel zu den Unterrichtsmaterialien stellt gleichzeitig den Leitfaden für Lehrkräfte zu der Unterrichtseinheit zur Blasenkammer auf grundlegendem Anforderungsniveau dar.

4.1 Lernziele und Lernvoraussetzungen

In diesem Kapitel werden die konkreten Lernziele vorgestellt. Gleichzeitig wird das Vorwissen genannt, welches benötigt wird, um das Lernziel mit den im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien erreichen zu können. Die Inhalte der Lernziele stellen gleichzeitig die Inhalte der Unterrichtsmaterialien dar.

In Kapitel 4.5.2 befindet sich eine Übersicht darüber, welche Inhalte die einzelnen Materialien jeweils behandeln, also welche Ziele mit welchen Materialien erreicht werden können.

Lernziel: Die Schüler...**Benötigtes Vorwissen****Wesentliche Hintergründe zur Blasenkammer darstellen**

- erklären den Aufbau und das Funktionsprinzip der Blasen- kammer

- Begriffe Teilchen, Teilchenstrahlung/Strahlteilchen und Detektor
- Begriff der elektrischen Ladung
- Kenntnis von Elektron, Proton, Positron, Neutron, Photon und deren elektrischer Ladung
- Kenntnis, dass es verschiedene Ladungen gibt
- Kenntnisse über Wasserstoff: Aufbau in Molekülen aus zwei Atomen bestehend aus Elektronen und Protonen
- Volumen, Druck, Temperatur und deren Zusammenhänge (dient dem Verständnis der Wirkungsweise des Kolbens zur Volumenveränderung an der Blasen- kammer)
- Kenntnisse zum Magnetfeld: homogenes Magnetfeld, symbolische Darstellung von Feldlinien, Rechte-Hand-Regel¹ (Lorentzkraft)
- Compton-Streuung (qualitativ)
- Impulserhaltung
- Begriff „vektorielle Addition“

¹Zur Verdeutlichung der Wirkung der Lorentzkraft auf ein bewegtes elektrisch geladenes Teilchen wird hier die Rechte-Hand-Regel verwendet. Dabei zeigt der Daumen in die Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger, der Zeigefinger zeigt parallel zu den Magnetfeldlinien und der Mittelfinger gibt dann die Richtung der Kraftwirkung an. Für elektrisch negativ geladene Teilchen muss der Daumen entweder entgegen der Bewegungsrichtung zeigen oder die Kraftwirkung muss mit negativem Vorzeichen interpretiert werden.

- nennen den Zweck einer Blasenkammer
- nennen den heutigen Einsatz der Blasen-
kammer für die Suche nach dunkler Materie

Keine Vorkenntnisse notwendig

Rückschlüsse auf Eigenschaften von Teilchen ziehen

- ordnen den Teilchen, von welchen die Spuren stammen, die richtigen Vorzeichen der elektrischen Ladung zu

- Wissen, dass nur elektrisch geladene Teilchen in der Blasen-
kammer Spuren hinterlassen²
- Kennen der Rechte-Hand-Regel bzw. $\vec{F}_L = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$: Richtung der Ablenkung elektrisch geladener Teilchen im magnetischen Feld

²Dieses Wissen können die Schüler in den Einführungsmaterialien zur Blasen-
kammer erwerben.

- ziehen Rückschlüsse auf elektrisch neutrale Teilchen (z.B. Photonen)

- Impulserhaltungssatz: in der Blasenkammer muss in jedem Punkt der Impuls erhalten sein, die Summe der Impulse der Teilchen, deren Spuren zum Vertex hinführen muss gleich der Summe der Impulse der Teilchen sein, deren Spuren vom Vertex wegführen
- der Impuls ist eine vektorielle Größe: vektorielle Addition von Impulsen
- nur elektrisch geladene Teilchen hinterlassen Spuren in der Blasenkammer ³ (ist der Impulserhalt scheinbar verletzt, so ist an dem Prozess am Vertex (mindestens ein) neutrales Teilchen beteiligt.)
- Fähigkeiten zur Impulsermittlung über Krümmung und über Reichweite der Spur (s.u.)

³Dieses Wissen können die Schüler in den Einführungsmaterialien zur Blasenkammer erwerben.

Spuren bestimmten Teilchen zuordnen

- erkennen die Spur eines Protons
- erkennen die Spur eines Positrons
- erkennen die Spur eines Elektrons

- Kennen der Rechte-Hand-Regel bzw. $\vec{F}_L = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$: Abhängigkeit der Krümmungsrichtung der Spur in der Blasenkammer vom Vorzeichen der elektrischen Ladung des Teilchens, von dem die Spur stammt
- Nichtsichtbarkeit von elektrisch neutralen Teilchen in der Blasenkammer⁴
- Prozesse erkennen, aufgrund derer die Teilchen Spuren in der Blasenkammer hinterlassen

⁴Dieses Wissen können die Schüler in den Einführungsmaterialien zur Blasenkammer erwerben.

Prozesse identifizieren

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • erkennen die Wechselwirkung eines Strahlteilchens mit einem Elektron oder einem Proton • erkennen die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar • erkennen die Wechselwirkung eines Photons mit einem Elektron \rightarrow Compton-Streuung • erkennen die Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton | } | <ul style="list-style-type: none"> • Nichtsichtbarkeit von elektrisch neutralen Teilchen in der Blasenkammer⁵ • Ladungserhaltung • Kennen der Rechte-Hand-Regel bzw. $\vec{F}_L = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$: Abhängigkeit der Krümmungsrichtung der Spur in der Blasenkammer vom Vorzeichen der elektrischen Ladung des Teilchens, von dem die Spur stammt • Compton-Streuung (qualitativ) • Kennen der zu identifizierenden Prozesse⁵ |
|--|---|--|

⁵Dieses Wissen können die Schüler in den Einführungsmaterialien zur Blasenkammer erwerben.

Halbquantitative Rückschlüsse auf Eigenschaften von Teilchen ziehen

vergleichen die Impulse/die
Geschwindigkeiten von

- zwei Elektronen über die Krümmung der Spuren
- Elektron und Proton über die Krümmung der Spuren
- Elektron und Positron über die Krümmung der Spuren

- Lorentzkraft $F_L = Q \cdot v \cdot B$
- Zentripetalkraft $F_Z = \gamma \frac{m \cdot v^2}{r}$
- Impuls $p = \gamma \cdot m \cdot v$
- Bewegung eines elektrisch geladenen Teilchens im elektromagnetischen Feld:
 $F_Z = F_L \Rightarrow p = Q \cdot B \cdot r$
- Kenntnisse über die Ruhemassen der Teilchen: Ruhemasse des Elektrons=Ruhemasse des Positrons \neq Ruhemasse des Protons

Quantitative Rückschlüsse auf Eigenschaften von Teilchen ziehen

- berechnen den Impuls eines Teilchens über die Krümmung seiner Spur

- Krümmungsradien in GeoGebra ermitteln⁶
- Lorentzkraft $F_L = Q \cdot v \cdot B$
- Zentripetalkraft $F_Z = \gamma \frac{m \cdot v^2}{r}$
- Impuls $p = \gamma \cdot m \cdot v$
- Bewegung eines elektrisch geladenen Teilchens im elektromagnetischen Feld:
 $F_Z = F_L \Rightarrow p = Q \cdot B \cdot r$
- Verwendung der Einheit eV
 - Einheit des Impulses $\frac{\text{GeV}}{c}$
 - Formel für Impulsberechnung aus Krümmungsradius $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ (siehe z.B. (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(a)))

⁶Dieses Wissen können die Schüler in den Einführungsmaterialien zu GeoGebra erwerben.

- bestimmen den Impuls eines Teilchens über seine Reichweite (Blackbox)

- Wissen, dass die Reichweite der Spurlänge entspricht
- Kenntnis, dass es eine Impuls-Reichweite-Beziehung gibt: Impuls ist aus Reichweite bestimmbar, keine Kenntnisse über den qualitativen Zusammenhang in dieser Beziehung notwendig! Die Bestimmung erfolgt als Blackbox: Die Schüler bestimmen die Reichweite in GeoGebra und der zugehörige Impuls wird automatisch ausgegeben.
- Ermitteln von Spurlängen (Reichweiten) in GeoGebra, z.B. mit dem Werkzeug „Streckenzug“⁷.
- Lorentzkraft $F_L = Q \cdot v \cdot B$
- Zentripetalkraft $F_Z = \gamma \frac{m \cdot v^2}{r}$
- Impuls $p = \gamma \cdot m \cdot v$
- Bewegung eines elektrisch geladenen Teilchens im elektromagnetischen Feld: $F_Z = F_L \Rightarrow p = Q \cdot B \cdot r$
- Verwendung der Einheit eV
 - Einheit des Impulses $\frac{\text{GeV}}{c}$
 - Formel für Impulsberechnung aus Krümmungsradius $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ (siehe z.B. (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(a)))

Tabelle 4.1: Die Lernziele und Lerninhalte der Unterrichtsmaterialien

⁷Dieses Wissen können die Schüler in den Einführungsmaterialien zu GeoGebra erwerben.

4.2 Technische Voraussetzungen

Für die Bearbeitung der Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen 2644, 2650, 2691, 2722 und 2811 wird je Schüler(-paar) ein Computer bzw. ein Laptop mit Internetzugang benötigt. Es empfiehlt sich eine Bildschirmdiagonale von mindestens 15 Zoll, damit die Schrift gut lesbar ist und die Schüler die Konstruktionen auf den Blasenkammeraufnahmen problemlos durchführen können.

Für die Bearbeitung der Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen 2670 und 2830 wird nicht zwingend ein Internetzugang benötigt, diese können auch auf dem jeweiligen analogen Arbeitsblatt allein bearbeitet werden. Für die Einführung in GeoGebra wird ebenfalls ein Computer bzw. Laptop mit Internetzugang benötigt. Die Einführung in die Blasenkammer ist entweder online oder offline durchführbar, da diese auch als PDF zur Verfügung gestellt wird (siehe Anhang A).

Zu jedem digitalen Arbeitsblatt gibt es ein zugehöriges analoges Arbeitsblatt sowie ein Lösungsblatt. Es ist vorgesehen, dass diese den Schülern jeweils in ausgedruckter Form zur Verfügung gestellt werden.

4.3 Einstieg

Der Einstieg in die Unterrichtseinheit zur Blasenkammer sollte für die Schüler motivierend sein, darf hierbei aber nicht konstruiert wirken. Der Unterricht zu Blasenkammern lässt sich gut im Rahmen einer Einheit zum Standardmodell einsetzen, da die Schüler dann bereits Vorwissen zu Wechselwirkungen und daraus resultierenden Erhaltungssätzen mitbringen und so Hintergründe besser verstehen können. Haben die Schüler bereits Kenntnisse über das Quarkmodell, so eignet sich die Bestätigung des Quarkmodells ((siehe. Harigel, Bubble Chamber und Particle Physics 1994, S.437)) für einen Einstieg in eine Unterrichtseinheit zu Blasenkammeraufnahmen. Des Weiteren können auch weitere Vermächnisse der Blasenkammer hinzugezogen werden (siehe Kapitel 2.2.3).

Als Einstieg eignet sich z.B. ein Artikel aus dem Spiegel von 1967 (Nr.41) mit dem Titel „Rat der Weisen“ (<http://magazin.spiegel.de/EpubDelivery/spiegel/pdf/46289948>). Dieser Artikel beschreibt den geplanten Bau eines neuen Ringbeschleunigers. Gleichzeitig macht der Artikel aber auch auf die Notwendigkeit der Blasenkammer als Detektor aufmerksam, denn ohne sie ist der Beschleuniger nutzlos, da die Physiker im wahrsten Sinne des Wortes nichts von den Wechselwirkungen der Teilchen sehen können.

Als Kontext wird hier der historische Kontext der Blasenkammeraufnahmen gewählt, da die Blasenkammer ein mächtiges Werkzeug in der Teilchenphysik war, welches viele neue Erkenntnisse hervorbrachte und gleichzeitig einen hohen Anschauungsgrad besitzt.

Zusätzlich zum historischen Kontext ist die Verknüpfung mit der Medizin sowie mit weiteren Anknüpfungspunkten möglich (s.u.), z.B. wenn die Materialien zu den Blasenkammerauf-

nahmen als Anwendung der Kenntnisse zur Bewegung von elektrisch geladenen Teilchen im magnetischen Feld eingesetzt werden sollen.

4.3.1 Verknüpfung zur Medizin

Bei der Auswertung der Blasenkammeraufnahmen spielt die Impuls-Reichweite-Beziehung eine entscheidende Rolle⁸.

Auch in der modernen Medizin ist diese Beziehung sehr wichtig, z.B. in der Ionentherapie zur Behandlung von Krebs. Dies ist ein möglicher Anknüpfungspunkt für die Anwendung des Wissens, welches auch im Zusammenhang mit Blasenkammern verwendet wird. Die unten beschriebene Vorgehensweise bietet eine mögliche Verknüpfung für die Schüler. Zum genaueren Verständnis sind Kenntnisse über den Bragg-Peak als Vorwissen notwendig. Ist dieses Vorwissen vorhanden, kann im Unterricht auch thematisiert werden, dass die Protonen am Ende ihrer Reichweite die meiste Energie deponieren (siehe z.B.

<http://www.rptc.de/de/protonentherapie/bestrahlung-mit-protonen/eigenschaften-vonprotonenstrahlen.html>).

- **Einführung**

Therapie mit Teilchenstrahlung: Ionentherapie bei Krebs, hier ist die Reichweite wichtig (vgl. Highlights der Physik 2011 S.24 unter <https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/themenhefte/highlights-2011.pdf>)

- **Protonentherapie: Warum ist Protonentherapie besonders zielführend?**

Schüler recherchieren im Internet zur Protonentherapie, z.B. unter

<https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/Willkommen.113005.0.html> (Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum) oder <http://www.rptc.de> (Rinecker Proton Therapy Center), dazu bearbeiten sie folgende Aufgaben:

- Nenne eine Krankheit, bei welcher die Protonentherapie angewandt werden kann.
- Beschreibe **kurz** die Vorgehensweise bei der Protonentherapie.
- Beschreibe die Vorteile der Protonentherapie gegenüber anderen Behandlungsmethoden (z.B. Therapie mit Röntgenstrahlen).
- Nenne physikalische Eigenschaften von Protonen, die bekannt sein müssen, damit diese Therapieart sinnvoll eingesetzt werden kann.

- **Zusammenhang Reichweite und Energie der Protonen**

⁸Für die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Aufgaben ist die Impuls-Reichweite-Beziehung nicht zentral, da diese nur in den Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2811 als Blackbox vorkommt. Für die Auswertung von Blasenkammeraufnahmen im Allgemeinen war diese Beziehung aber von zentraler Bedeutung.

- Schüler erkennen, dass die Kenntnis der Reichweite der Protonen notwendig ist (s.o., letzte Frage zur Protonentherapie), damit diese Therapieart sinnvoll eingesetzt werden kann
 - Zusammenhang Reichweite und Energie: Die Energie der Protonen kann präzise eingestellt werden und somit ihre Reichweite bestimmt werden.
- Blasenkammerbild mit Protonenspurspur: hier Reichweite messbar
 - Rückschluss auf Impuls möglich

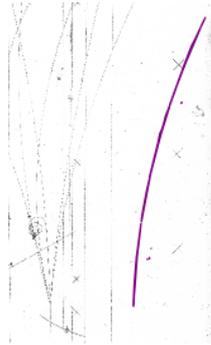


Abbildung 4.1: Die Spur eines Protons in der Blasenkammer ist violett hervorgehoben. Da die Spur in der Blasenkammer endet, lässt sich der Impuls des Protons aus der Reichweite bestimmen.

- **Einheit zu Blasenkammern**

- Einführung in die Blasenkammer
- ggf. Einführung in Geogebra
- Bearbeitung von Blasenkammeraufnahmen → Es sollte die Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2811 bearbeitet werden, da hier die Impulsbestimmung über die Reichweite erfolgt und somit die Blasenkammereinheit einen Zusammenhang zur Protonentherapie hat.
- möglicher Exkurs: Wo begegnen uns Blasenkammern? (siehe Kapitel 4.3.2)

- **Abschließende Betrachtungen zum Zusammenhang von Blasenkammeraufnahmen und Protonentherapie**

- Schüler nennen Zusammenhänge zwischen der Auswertung von Blasenkammeraufnahmen und dem Wissen, welches zum Einsatz von Protonentherapie benötigt wird

4.3.2 Weitere mögliche Anknüpfungspunkte

Wo begegnen uns Blasenkammern?

- **Moderne Physik: Suche nach dunkler Materie**

- Am SNOLAB in Kanada wird mit Hilfe von Blasenkammern nach dunkler Materie in Form von WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) gesucht
- WIMPs hinterlassen eine Blase in einer bestimmten Art von Blasenkammer
- Weitere Infos unter <http://www-coupp.fnal.gov/>

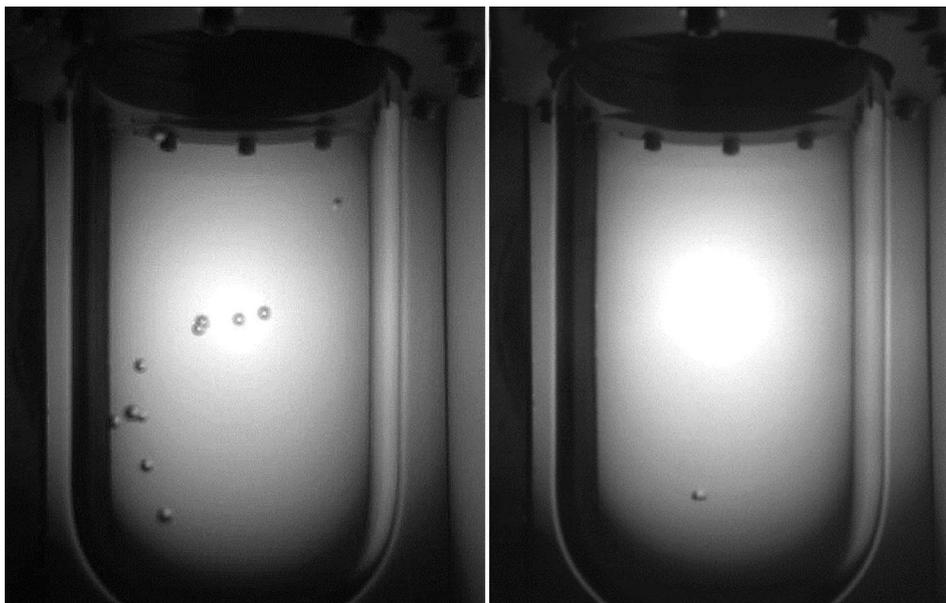


Abbildung 4.2: Blasenkammeraufnahmen, links: „gewöhnliche Spur“, rechts: einzelne Blase, Hinweis auf ein WIMP (https://www.snolab.ca/sites/default/files/couppbubble_large.jpg 2015)

- **Literatur: „In der Blasenkammer“**

- Literatur von Paul Celan
- Interpretation des Gedichtes in dem Artikel „Versetzte Sprachen“ von Holger Steinmann, z.B. zu finden unter http://www.germanistik-im-netz.de/gindok/frontdoor?source_opus=22072

Gedicht von Paul Celan: „In der Blasenkammer“

In der Blasenkammer erwacht

das Entatmete, der
gefährliche Keimling

An seinem Krater-
ende
springt das Drittauge auf
und speit
Porphyry, auch
Pein

• **Kunst: Schönheit von Blasenkammeraufnahmen**

- Kunstwerke von Lylie Fisher
- Ausschnitte von Blasenkammeraufnahmen werden als Kunstwerk verwendet
- Weitere Infos unter Protonen am Ende ihrer Reichweite die meiste Energie deponieren (siehe z.B.

<http://www.symmetrymagazine.org/sites/default/files/legacy/pdfs/200612/gallery.pdf>



Abbildung 4.3: Blasenkammeraufnahme als Kunstwerk
(<http://www.symmetrymagazine.org/> 2006)

- **Musik: Blaskammeraufnahmen zum Zuhören**

- Musik von Domenico Vicinanza
- Vertonung von Blaskammeraufnahmen
- Weitere Infos unter <http://www.isgtw.org/feature/smallest-music-universe>

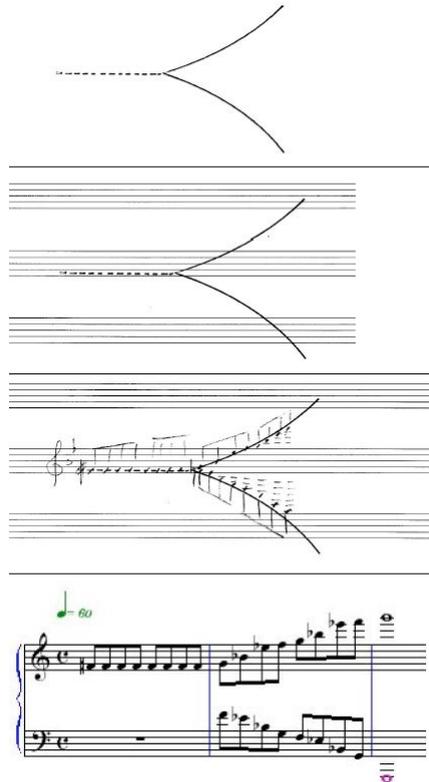


Abbildung 4.4: Schrittweise Vertonung einer Blaskammeraufnahme (<http://www.isgtw.org> 2015)

4.4 Erarbeitung von Grundlagenwissen

Die erstellten Unterrichtsmaterialien beinhalten zwei verschiedene Einführungseinheiten zum Erarbeiten von Grundlagenwissen: zum einen eine Einführung in die Blaskammer und zum anderen eine Einführung in die dynamische Geometriesoftware GeoGebra.

4.4.1 Einführung in die Blaskammer

Mit diesem Material können die folgenden Ziele erreicht werden:

- Die Schüler erklären den Aufbau und das Funktionsprinzip der Blasenkammer.
- Die Schüler nennen den Zweck einer Blasenkammer.
- Die Schüler nennen den heutigen Einsatz der Blasenkammer für die Suche nach dunkler Materie.

Das benötigte Vorwissen für dieses Material ist in Kapitel 4.1 dargelegt.

Zu der Einführung in die Blasenkammer ist die parallele Bearbeitung der Arbeitsblätter „Aufbau der Blasenkammer“ (siehe Anhang C.1) und „Arbeitsblatt zur Teilchenidentifikation“ (siehe Anhang C.2) vorgesehen. Die Einführung in die Blasenkammer ist *online* (siehe Kapitel 4.5.3) und alternativ als PDF (siehe Anhang A) verfügbar und behandelt folgende Punkte:

- Erfinder der Blasenkammer

Die Blasenkammer und das Bier



Donald Glaser, 1960
Quelle: <http://imglib.lbl.gov/>

Donald Glaser erfand die Blasenkammer im Jahr 1952 und erhielt dafür bereits 1960 den Nobelpreis.

Einer Sage nach kam er auf die Idee, die Blasenkammer zu erfinden, als er im Bier aufsteigende Blasen beobachtete.

Zurück zur Einführung

Abbildung 4.5: Eine Folie der Einführung in die Blasenkammer

- Aufbau der Blasenkammer
- Aussehen von Blasenammern
- Einsatz von Blasenammern heute
- Spuridentifikation und Erkennen von Prozessen in der Blasenkammer
 - Elektron
 - * aus Wechselwirkung mit Strahlteilchen
 - * aus Compton-Streuung

- Proton
 - * aus Wechselwirkung mit Strahlteilchen
 - * aus Wechselwirkung mit Neutron
- Positron
 - * aus der Umwandlung eines Photons in eine Elektron-Positron-Paar
- Sichtbarkeit und Detektion neutraler Teilchen
- Sichtbarkeit von Spuren in der Blasenkammer
- Erklärung des Wortes Vertex

4.4.2 Einführung in GeoGebra

Dieses Material dient dem Ziel, den Schülern die Aneignung der nötigen Fertigkeiten im Umgang mit GeoGebra für die Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen zu ermöglichen. Für dieses Material wird kein Vorwissen benötigt.

Diese Einführung ist online verfügbar (siehe Kapitel 4.5.3) und behandelt folgende Punkte:

- Einführung in GeoGebra
 - Werkzeuggestreife
 - Eingabezeile
 - Algebrafenster
- Kreise und Radien
 - Kreiswerkzeuge
 - Werkzeug „Kreis durch drei Punkte“
 - Radius
- Tangenten und Vektoren
 - Werkzeug „Tangenten“
 - Verwendung von Vektoren und Tangenten zur Vektoraddition
 - Tangente an einen Streckenzug
- Streckenzug
 - Werkzeug „Streckenzug“

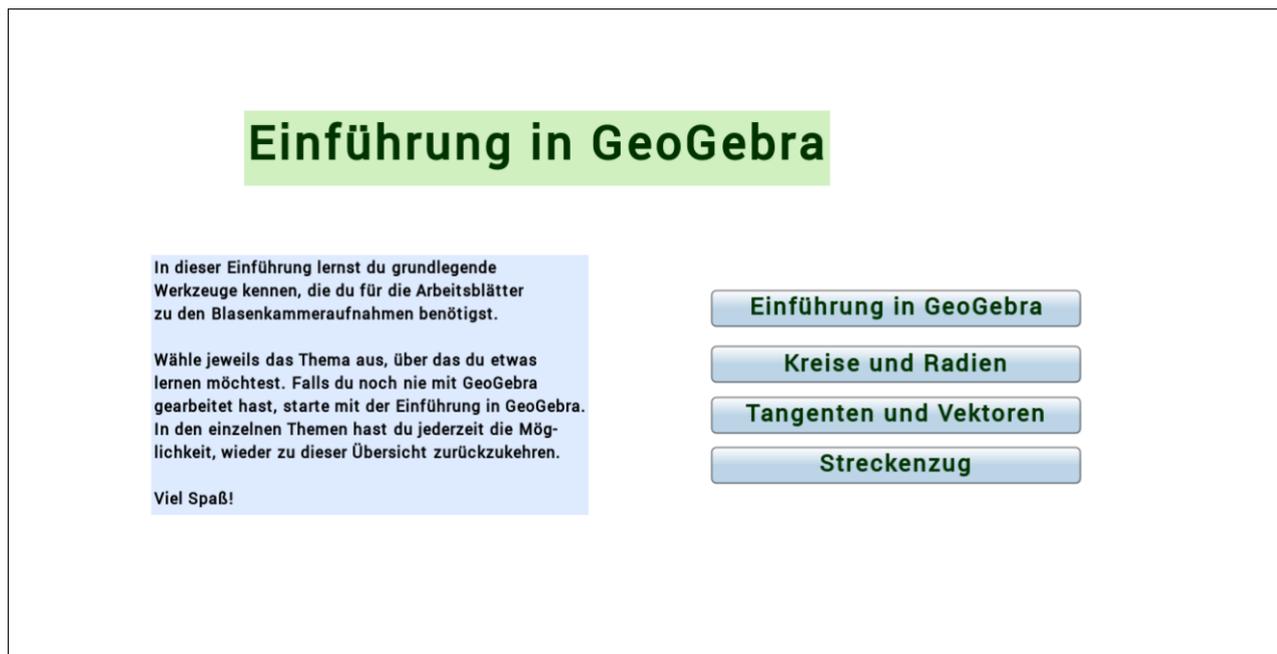


Abbildung 4.6: Eine Folie der Einführung in GeoGebra

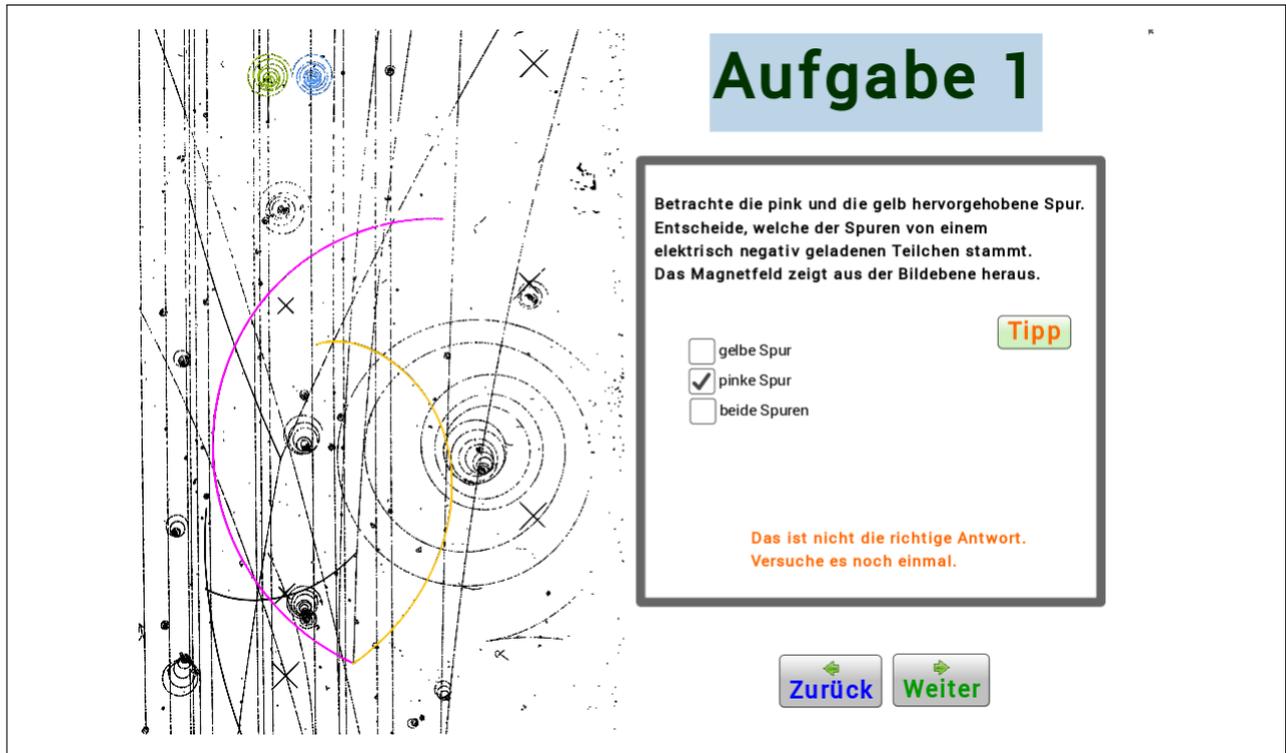
4.5 Die Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen

In diesem Abschnitt werden die Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen selbst näher erläutert.

4.5.1 Aufbau und Einsatz der Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen

Aufbau

Ein Aufgabensatz besteht immer aus einem digitalen Arbeitsblatt und einem analogen Arbeitsblatt (siehe Anhang C). Des Weiteren wird jeweils ein analoges Lösungsblatt angeboten (siehe Anhang D). In die digitalen Arbeitsblätter ist eine Feedbackfunktion (siehe Abbildung 4.7) sowie eine Hinweisfunktion (siehe Abbildung 4.8) eingebaut.



Aufgabe 1

Betrachte die pink und die gelb hervorgehobene Spur.
Entscheide, welche der Spuren von einem elektrisch negativ geladenen Teilchen stammt.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

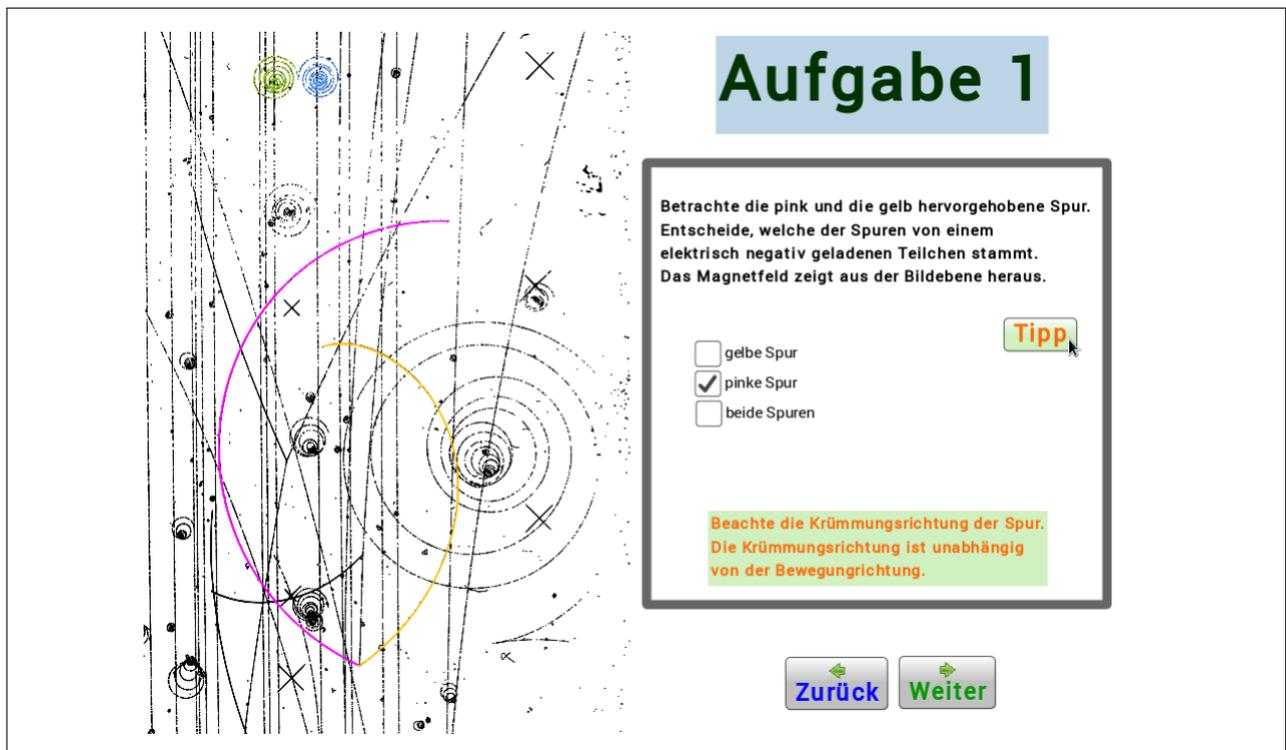
gelbe Spur
 pinke Spur
 beide Spuren

Tipp

Das ist nicht die richtige Antwort.
Versuche es noch einmal.

Zurück **Weiter**

Abbildung 4.7: Ein Feedback zu einer falschen Antwort auf dem digitalen Arbeitsblatt 2722



Aufgabe 1

Betrachte die pink und die gelb hervorgehobene Spur.
Entscheide, welche der Spuren von einem elektrisch negativ geladenen Teilchen stammt.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

gelbe Spur
 pinke Spur
 beide Spuren

Tipp

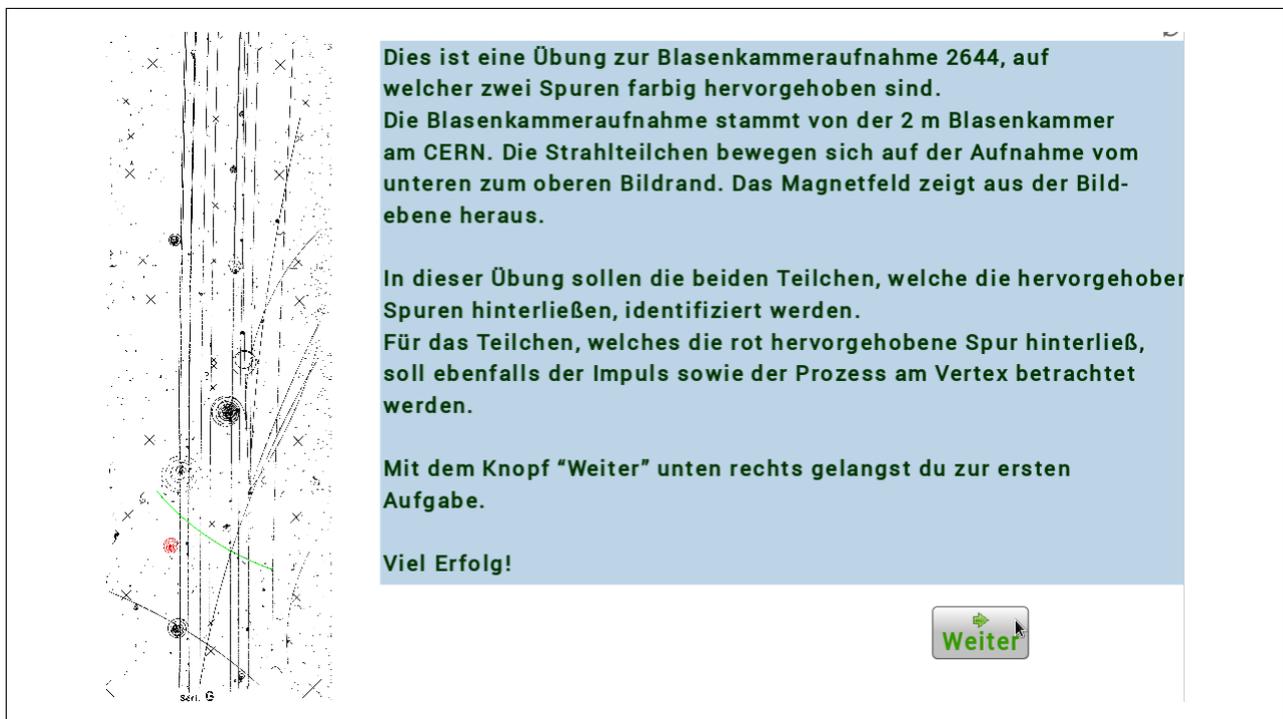
Beachte die Krümmungsrichtung der Spur.
Die Krümmungsrichtung ist unabhängig von der Bewegungsrichtung.

Zurück **Weiter**

Abbildung 4.8: Ein Tipp zu einer falschen Antwort auf dem digitalen Arbeitsblatt 2722

Die Materialien sind so konzipiert, dass bei den Arbeitsblättern zu den Blasenkammeraufnahmen 2644, 2650, 2691, 2722 und 2811 die Bearbeitung parallel auf digitalem und analogem Arbeitsblatt erfolgen soll. Hierbei dient das analoge Arbeitsblatt der Ergebnissicherung und dem Abfragen von Begründungen und Rechenwegen. Die Aufgaben zu den Aufnahmen 2670 und 2830 sind so konzipiert, dass die Bearbeitung nur auf dem analogen Arbeitsblatt erfolgt. Das digitale Arbeitsblatt steht lediglich zum Hereinzoomen oder für freiwillige Berechnungen mit GeoGebra zur Verfügung. Für diese beiden Aufgaben kann aber auch das analoge Arbeitsblatt allein eingesetzt werden.

Alle Arbeitsblätter haben einen einführenden Text (siehe Abbildung 4.9) und beginnen mit qualitativen Aufgaben und enden mit halbquantitativen bzw. quantitativen Aufgaben.



Dies ist eine Übung zur Blasenkammeraufnahme 2644, auf welcher zwei Spuren farbig hervorgehoben sind. Die Blasenkammeraufnahme stammt von der 2 m Blasenkammer am CERN. Die Strahlteilchen bewegen sich auf der Aufnahme vom unteren zum oberen Bildrand. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

In dieser Übung sollen die beiden Teilchen, welche die hervorgehobenen Spuren hinterließen, identifiziert werden. Für das Teilchen, welches die rot hervorgehobene Spur hinterließ, soll ebenfalls der Impuls sowie der Prozess am Vertex betrachtet werden.

Mit dem Knopf "Weiter" unten rechts gelangst du zur ersten Aufgabe.

Viel Erfolg!

Weiter

Abbildung 4.9: Der Einführungstext auf dem digitalen Arbeitsblatt 2644

Die Schwierigkeitsabstufung ist wie folgt (von leicht nach schwer):

- 2650 - nur qualitative und halbquantitative Aufgaben⁹
- 2811 - quantitative Aufgabe: Reichweitenermittlung, Impulsausgabe aus Reichweite über Blackbox
- 2644 - quantitative Aufgabe: Ermittlung eines Impulses aus der Krümmung der Spur

⁹2650, 2644, 2691, 2722 und 2811 bieten Auswahlmöglichkeiten für die qualitativen Aufgaben und Tipps für alle Aufgabentypen

- 2691 und 2722 - quantitative Aufgabe: Ermittlung von zwei Impulsen aus der Krümmung und Rückschluss auf den Impuls des Photons
- 2670 - freie Aufgaben (ohne vorgegebene Antwortmöglichkeiten): qualitativ und halb-quantitativ
- 2830 - freie Aufgaben (ohne vorgegebene Antwortmöglichkeiten): quantitative Aufgabe: Ermittlung des Impulses eines Photons über vektorielle Addition aus den vorgegebenen Impulsen eines Elektrons und eines Positrons

Einsatz

Die Aufgaben zu den Blasenkammeraufnahmen können unabhängig voneinander eingesetzt werden. Wird der Anknüpfungspunkt zur Medizin gewählt, sollten die Aufgaben zur Aufnahme 2811 bearbeitet werden, da hier die Impuls-Reichweite-Beziehung vorkommt, allerdings nur als Blackbox¹⁰ (siehe Abbildung 4.10).

The image shows a digital worksheet titled 'Aufgabe 4'. On the left is a bubble chamber photograph with two red tracks originating from a central vertex. The tracks are labeled with letters: 'F', 'N', 'M', 'L', 'K', 'D', 'E', 'H', 'J'. A coordinate '(18.767, 173.37)' is visible in the top left corner. On the right is a solution box with the following text:

Aufgabe 4

Die beiden rot hervorgehobenen Spuren gehen vom gleichen Vertex aus. Ermittle den Impuls der Teilchen, indem du ihre Reichweite bestimmst. Gib die Reichweite auf eine Nachkommastelle gerundet an.

Reichweite hellrot = 9.9 cm Tipp

Richtig, der Impuls beträgt $0.265 \frac{\text{GeV}}{c}$

Reichweite dunkelrot = 8.9 cm

Richtig, der Impuls beträgt $0.260 \frac{\text{GeV}}{c}$

Abbildung 4.10: Das digitale Arbeitsblatt 2811 gibt nach richtiger Eingabe der Reichweiten automatisch die zugehörigen Impulse aus

Je nach verfügbarem Zeitfenster können nur einige oder alle Arbeitsblätter eingesetzt werden. Es empfiehlt sich ein Einsatz nach aufsteigender Schwierigkeit. Die Arbeitsblätter können allerdings auch zum Stationenlernen eingesetzt werden. Hier eignen sich die Lösungen besonders

¹⁰Blackbox meint in diesem Kontext, dass die Schüler die Reichweite einer Spur messen und das digitale Arbeitsblatt den zugehörigen Impuls automatisch ausgibt. Es wird hier eine Protonenspur gemessen, das Arbeitsblatt gibt entsprechend die Reichweite aus. Es wird keine Kenntnis der Impuls-Reichweite-Beziehung benötigt.

zur Selbstkontrolle. Die verschiedenen Schwierigkeitsgrade können ebenfalls zur Differenzierung genutzt werden. In der unten stehenden Tabelle sind die Ziele aufgelistet, die mit dem jeweiligen Arbeitsblatt erreicht werden können. Das benötigte Vorwissen zu dem entsprechenden Ziel findet sich im Abschnitt 4.1. Die Ziele entsprechen jeweils den Inhalten der Arbeitsblätter und sind in der Tabelle der inhaltlichen Abfolge der Arbeitsblätter entsprechend angeordnet.

4.5.2 Übersicht über die Ziele der Aufgabenblätter

Arbeitsblattnummer ¹¹	Lernziel: Die Schüler...
2644	<ul style="list-style-type: none"> • erkennen die Spur eines Protons • erkennen die Spur eines Elektrons • erkennen die Wechselwirkung eines Strahlteilchens mit einem Elektron • berechnen den Impuls eines Teilchens über die Krümmung seiner Spur
2650	<ul style="list-style-type: none"> • ordnen den Teilchen, von welchen die Spuren stammen, die richtigen Ladungsvorzeichen zu • vergleichen die Geschwindigkeiten von zwei Elektronen über die Krümmung der Spuren • erkennen die Spur eines Protons • erkennen die Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton

¹¹Die Nummer des Arbeitsblattes entspricht der Nummer der Blaskammeraufnahme.

2670

- erkennen die Spur eines Elektrons
- vergleichen die Geschwindigkeiten von zwei Elektronen über die Krümmung der Spuren
- ordnen den Teilchen, von welchen die Spuren stammen, die richtigen Ladungsvorzeichen zu
- vergleichen die Impulse von einem elektrisch positiv geladenen Teilchen und einem Elektron über die Krümmung der Spuren

2691

- erkennen die Spur eines Positrons
- erkennen die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron- Paar
- vergleichen die Geschwindigkeiten von Elektron und Positron über die Krümmung der Spuren
- berechnen den Impuls eines Teilchens über die Krümmung seiner Spur
- ziehen einen Rückschluss auf ein elektrisch neutrales Teilchen (Photon)

2722

- ordnen den Teilchen, von welchen die Spuren stammen, die richtigen Ladungsvorzeichen zu
- erkennen die Spur eines Positrons
- erkennen die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron- Paar
- berechnen den Impuls eines Teilchens über die Krümmung seiner Spur
- ziehen einen Rückschluss auf ein elektrisch neutrales Teilchen (Photon)

2811

- erkennen die Wechselwirkung eines Photons mit einem Elektron \rightarrow Compton-Streuung
- erkennen die Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton
- vergleichen die Impulse von Elektron und Positron über die Krümmung der Spuren
- bestimmen den Impuls eines Teilchens über seine Reichweite (Blackbox)
- ziehen einen Rückschluss auf ein elektrisch neutrales Teilchen

2830

- erkennen die Wechselwirkung eines Strahlteilchens mit einem Elektron
- erkennen die Spur eines Positrons
- erkennen die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron- Paar
- ziehen einen Rückschluss auf ein elektrisch neutrales Teilchen (Photon)

Tabelle 4.2: Übersicht über die Ziele der einzelnen Arbeitblätter zu den Blasenkammeraufnahmen

4.5.3 Links zu den digitalen Materialien

In diesem Abschnitt befindet sich eine Auflistung der Links zu den digitalen Materialien. Diese Materialien befinden sich zudem als GeoGebra-Dateien auf der beigelegten CD.

- **Einführung in die Blasenkammer**
<http://tube.geogebra.org/student/mJX8UIu8a>
- **Einführung in GeoGebra**
<http://tube.geogebra.org/student/mCmLLS8Ls>
- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2644**
<http://tube.geogebra.org/student/mL5a6txCC>
- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2650**
<http://tube.geogebra.org/student/mDkYjlYUi>
- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2670**
<http://tube.geogebra.org/student/mVlMsKdPp>
- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2691**
<http://tube.geogebra.org/student/mzG3ZC00j>
- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2722**
<http://tube.geogebra.org/student/mbB5GXTP7>
- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2811**
<http://tube.geogebra.org/student/mz7H0jG4U>

- **Aufgaben zur Blasenkammeraufnahme 2830**

<http://tube.geogebra.org/student/mkWfE1Hzp>

4.6 Lernzielkontrolle

Als Lernzielkontrolle sollte eine geeignete Form für die Überprüfung der angestrebten Lernziele gewählt werden.

Für die Überprüfung zum Aufbau der Blasenkammer eignet sich der erneute Einsatz des analogen Arbeitsblattes zum Aufbau der Blasenkammer (siehe Anhang C.1).

Für die Kontrolle der anderen Ziele eignen sich zum einen konkrete Fragen nach den Inhalten, z.B.

- Beschreibe, wofür eine Blasenkammer eingesetzt werden kann.
- Erkläre, wie du anhand der Krümmungsradien zweier Spuren in der Blasenkammer entscheiden kannst, welches der zugehörigen Teilchen einen größeren Impuls besitzt.

Zum anderen eignet sich auch eine analoge Blasenkammeraufnahme als Lernzielkontrolle. Wird eines der Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen 2670 oder 2830 nicht im Unterricht eingesetzt, so kann dieses z.B. als Lernzielkontrolle verwendet werden.

5 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten und begründeten Materialien ermöglichen den Einsatz als in sich geschlossene Unterrichtssequenz. Aufgrund der begrenzten Zeit war es nicht möglich, eine noch größere Anzahl an Unterrichtsmaterialien zu erstellen oder diese noch tiefergehend zu verknüpfen. In diesem Kapitel sollen Erweiterungsmöglichkeiten vorgestellt werden, welche bei einer zukünftigen Bearbeitung umgesetzt werden könnten.

Im Kapitel „Didaktische Überlegungen“ wird der Einsatz der verwendeten Medien begründet. In Bezug auf die Art der digitalen Arbeitsblätter und deren Verknüpfung gibt es die Möglichkeit, die einzelnen Arbeitsblätter zu einem sogenannten tutoriellen Programm zusammenzufassen. Ein solches Programm würde die Fähigkeiten des jeweiligen Schülers testen und entsprechende Folgeaufgaben anbieten und somit automatisch differenzieren (vgl. Hopf, Wiesner und Schecker 2011, S.121). Eine weitere Variante ist, den Schülern selbst die Möglichkeit der Differenzierung zu geben, das heißt sie selbst den Schwierigkeitsgrad bestimmen zu lassen (vgl. Kircher 2009, S.633). In Bezug auf die Lerndauer und die Lerngeschwindigkeit erfüllen die Materialien den Anspruch der Selbststeuerung bereits jetzt, da die Schüler bei der eigenständigen Bearbeitung der Arbeitsblätter ihr Tempo selbst bestimmen können. Werden die Materialien z.B. als Stationsarbeit angeboten und weist der Lehrer gleichzeitig seine Schüler auf die jeweiligen Schwierigkeitsgrade hin, so kann auch hier das Arbeitstempo und in gewissem Rahmen auch die Dauer von den Lernenden selbst bestimmt werden.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Differenzierung stellt die Erstellung der verschiedenen Arbeitsblätter in jeweils unterschiedlichen Anforderungsniveaus dar. Eventuell sogar insoweit, dass sich die Erkenntnisse aus den verschiedenen Niveaus nicht gegenseitig beinhalten und so im Anschluss an die Bearbeitung im Unterrichtsgespräch oder in Kleingruppen das Wissen zusammengetragen werden kann. So könnte den einzelnen Schülern noch besser zu einem Erfolgserlebnis verholfen werden.

Da die Arbeitsblätter über das Internet zur Verfügung gestellt werden, stellen sie eine Form des *E-Learning* dar. Allerdings erfüllen sie nicht alle möglichen Aspekte dieses Formats. So könnten sie um eine Kommunikationsfunktion mit anderen Lernenden oder Betreuern erweitert werden (vgl. Kircher 2009, S. 442).

Ein weiterer Aspekt, der noch Ausbaumöglichkeiten zuließe, ist die Abdeckung der inhaltlichen Möglichkeiten. So wird im Rahmen der in dieser Arbeit erstellten Materialien nur ein kleiner Teil der auf Blasenkammeraufnahmen sichtbaren Spuren betrachtet. Da der Anspruch

jedoch war, Aufgaben auf grundlegendem Anforderungsniveau zu erstellen, ist auf die Betrachtung komplexerer Prozesse verzichtet worden. Für weiterführende Aufgaben sei auf die Arbeit „Einsatz von Blasenkammerbildern auf erhöhtem Anforderungsniveau“ von Floria Naumann verwiesen.

6 Abbildungsverzeichnis

2.1	Das Konzept der Theorie des „Standardmodells der Teilchenphysik“ (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))	3
2.2	Schwache Ladungszahlen von Materie und Anti-Materie (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c)), hier werden die Anti-Farben „anti-rot“, „anti-blau“ und „anti-grün“ durch die Farben „cyan“, „gelb“ und „magenta“ dargestellt	8
2.3	Veranschaulichung der Farbladungsvektoren (Abbildung links) und der Anti-Farbladungsvektoren (Abbildung rechts) (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))	9
2.4	Anordnung von Materieteilchen im Standardmodell (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))	11
2.5	Farbladungsvektoren von Gluonen: links ein Gluon, das die Kombination aus „rot“ und „anti-grün“ besitzt, rechts die Darstellung aller möglichen Farb- und Anti-Farbladungskombinationen für Gluonen (Netzwerk Teilchenwelt in Vorbereitung(c))	12
2.6	Der Aufbau der Blasenkammer, erstellt unter Verwendung von camera-34441_1280 (http://pixabay.com 2012) und lamp-378369_1280 (http://pixabay.com 2014)	17
2.7	Impuls-Reichweite-Beziehung für (von links nach rechts) Myonen, Pionen, Kaonen und Protonen (Helzel 2002, S.63)	23
2.8	Franckenstein (Alvarez 1968, S.262)	24
2.9	Die Spur eines Protons ist hervorgehoben, sie scheint „aus dem Nichts zu kommen“. Das Proton ist durch ein elektrisch neutrales Teilchen (ein Neutron) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden.	26
2.10	Die türkis hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron-Positron-Paar, das durch die Umwandlung eines Photons entstanden ist.	26
2.11	Die rot hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron-Positron-Paar, das durch die Umwandlung eines Photons entstanden ist.	27
2.12	Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron, welches durch Compton-Streuung, also durch ein Photon, aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.	27
2.13	Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, das durch ein Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.	28
2.14	Der Vertex ist rot gekennzeichnet.	28

2.15	Die grün hervorgehobene Spur stammt von einem Elektron, das durch Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.	29
2.16	Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron, welches durch Compton-Streuung aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.	29
2.17	Die blau hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, das durch Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen (einem Proton) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.	30
2.18	Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, welches durch Wechselwirkung mit einem Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist. . . .	30
2.19	Die blau hervorgehobene Spur hinterließ ein Positron. Es ist Teil eines Elektron-Positron-Paares, das aus der Umwandlung eines Photons entstand.	31
2.20	Blasenkammeraufnahmen der am SNOLAB eingesetzten Blasenkammer, links: „gewöhnliche Spur“, rechts: einzelne Blase, Hinweis auf ein WIMP (https://www.snolab.ca/sites/default/files/couppbubble_large.jpg 2015)	33
3.1	Ausschnitt einer Blasenkammeraufnahme: links ist der unbearbeitete Ausschnitt zu sehen und rechts ist die Spur eines Elektron-Positron-Paares rot hervorgehoben . .	37
3.2	Die Benutzeroberfläche von GeoGebra	38
3.3	Die Spur eines Elektron-Positron-Paares ist türkis hervorgehoben	46
3.4	Compton-Streuung auf einer Blasenkammeraufnahme: violett hervorgehoben ist die Spur des Elektrons	46
4.1	Die Spur eines Protons in der Blasenkammer ist violett hervorgehoben. Da die Spur in der Blasenkammer endet, lässt sich der Impuls des Protons aus der Reichweite bestimmen.	58
4.2	Blasenkammeraufnahmen, links: „gewöhnliche Spur“, rechts: einzelne Blase, Hinweis auf ein WIMP (https://www.snolab.ca/sites/default/files/couppbubble_large.jpg 2015)	59
4.3	Blasenkammeraufnahme als Kunstwerk (http://www.symmetrymagazine.org/ 2006)	60
4.4	Schrittweise Vertonung einer Blasenkammeraufnahme (http://www.isgtw.org 2015)	61
4.5	Eine Folie der Einführung in die Blasenkammer	62
4.6	Eine Folie der Einführung in GeoGebra	64
4.7	Ein Feedback zu einer falschen Antwort auf dem digitalen Arbeitsblatt 2722	65
4.8	Ein Tipp zu einer falschen Antwort auf dem digitalen Arbeitsblatt 2722	65
4.9	Der Einführungstext auf dem digitalen Arbeitsblatt 2644	66

4.10 Das digitale Arbeitsblatt 2811 gibt nach richtiger Eingabe der Reichweiten automatisch die zugehörigen Impulse aus	67
---	----

7 Tabellenverzeichnis

4.1 Die Lernziele und Lerninhalte der Unterrichtsmaterialien	55
4.2 Übersicht über die Ziele der einzelnen Arbeitblätter zu den Blasenkammeraufnahmen	71

8 Literatur

- Alvarez, Luis W. (1968). „Recent developments in particle physics Nobel Lecture“. In: *Nobel Lecture*.
- Berger, Christoph (2002). *Elementarteilchenphysik / von den Grundlagen zu den modernen Experimenten ; mit 51 Tabellen und 88 Übungen mit Lösungshinweisen*. Springer. ISBN: 3540415157.
- Bleck-Neuhaus, Jörn (2010). *Elementare Teilchen / Moderne Physik von den Atomen bis zum Standard-Modell*. Springer. ISBN: 9783540852995.
- Coughlan, Guy D. und James Dodd (1996). *Elementarteilchen / eine Einführung für Naturwissenschaftler*. Vieweg. ISBN: 3528066210.
- Duit, Reinders. *Piko-Briefe - Der Fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst*. Tag der Recherche: 24.06.2015. URL: <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>.
- Elster, Doris (2007). „In welchen Kontexten sind naturwissenschaftliche Inhalte für Jugendliche interessant?“ In: *PLUS LUCIS*, S. 2–8.
- Fermilab (2010). Tag der Recherche: 20.05.2015. Fermilab. URL: <http://www.fnal.gov/pub/today/profiles/COUPP.html>.
- Gerthsen, Christian, Dieter [Hrsg.] Meschede und Helmut [Begr.] Vogel (2010). *Gerthsen Physik*. 24., überarb. Aufl. Springer. ISBN: 9783642128936.
- Glaser, Prof. Donald A. (1961). „Elementarteilchen und Blasenkammern“. In: *Physik Journal, Phys. Blätter* 17, S. 545–559.
- Griffiths, David J. (1996). *Einführung in die Elementarteilchenphysik*. Akademie-Verl. ISBN: 3055016270.
- Harigel, Gerd G. [Hrsg.], Conference on the Bubble Chamber und Its Contributions to Particle Physics (1994). *Bubbles 40 / proceedings of the conference on the bubble chamber and its contributions to particle physics (marking the 40th anniversary of the bubble chamber) ; Geneva, Switzerland 14 - 16 July*. North-Holland.
- Harigel, Gert G. *Bubble Chambers, Technology and Impact on High Energy Physics*. Tag der Recherche: 15.07.2015. CERN, Geneva.
- Harigel, Gert (1975). „Die Große Europäische Blasenkammer im CERN (Teil I)“. In: *Physik* 31, 13–28.

- Helzel, Christian (2002). „Erstellung eines computergestützten Versuchs des physikalischen Fortgeschrittenenpraktikums zur Auswertung von Blasenkammeraufnahmen.“ Magisterarb. Bonn: Staatliches Prüfungsamt Köln.
- Holstermann, Nina und Susanne Bögeholz (2007). „Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*; S. 71–86.
- Hopf, Martin, Hartmut Wiesner und Horst Schecker (2011). *Physikdidaktik kompakt*. Aulis. ISBN: 9783761427842.
- Jones, Goronwy Tudor (1994). „The bubble chamber and the public understanding of the physical sciences“. In: *Nuclear Physics B* 36, S. 467–474.
- Kircher, Ernst [Hrsg.] (2009). *Physikdidaktik / Theorie und Praxis*. 2. Aufl. Springer. ISBN: 9783642016011.
- Kleinknecht, Konrad (2005). *Detektoren für Teilchenstrahlung*. 4., überarb. Aufl. Teubner. ISBN: 3835100580.
- Kultusministerkonferenz (Dez. 2004a). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz- Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Recherche vom 24.07.2013. URL: http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf.
- Kultusministerkonferenz, Beschluss der (Feb. 2004b). *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik*. vom 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004). URL: http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1989/1989_12_01-EPA-Physik.pdf.
- Müller, Rainer (2007). *Physik in interessanten Kontexten- Handreichung für die Unterrichtsentwicklung*.
- Ne’eman, Yuval und Yoram Kirsh (1995). *Die Teilchenjäger*. Springer. ISBN: 3540532064.
- Netzwerk Teilchenwelt (in Vorbereitung[a]). *Schulmaterialien zur Teilchphysik: Forschungsmethoden*. Hrsg. von Joachim Herz Stiftung. JHS Verlag.
- (in Vorbereitung[b]). *Schulmaterialien zur Teilchphysik: Mikrokurse Teilchenphysik*. Hrsg. von Joachim Herz Stiftung. JHS Verlag.
- (in Vorbereitung[c]). *Schulmaterialien zur Teilchphysik: Wechselwirkungen und Teilchen*. Hrsg. von Joachim Herz Stiftung. JHS Verlag.
- Peter Häußler, Lore Hoffmann (2000). „A Curricular Frame for Physics Education: Development, Comparison with Students’ Interests, and Impact on Students’ Achievement and Self-Concept“. In: *Science Education* 84, S. 689–705.
- Physik Journal (1969). „Luis Alvarez: Nobelpreisträger für Physik 1968“. In: *Physik Journal, Phys. Blätter* 25, S. 175–177. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/phb1.19690250406>.
- Roger Erb, Thomas Wilhelm and Jochen Kuhn (2015). „Relativitätstheorie mit GeoGebra“. In: *Physik in unserer Zeit* 46, S. 151–152.

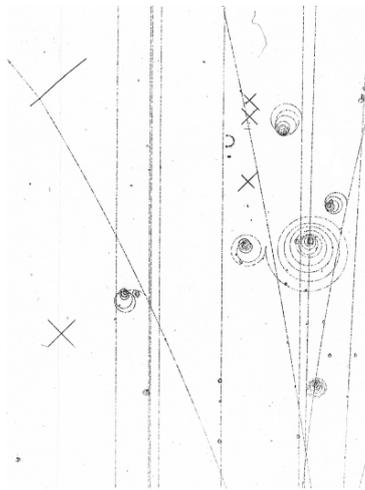
-
- Rugemer, Christine (2007). „Von Werten und Alternativen“. In: *research*eu - SONDERAUSGABE BILDUNG*, S. 7–9.
- SEHGAL, L.M. und P.M. ZERWAS (1976). „A MODEL FOR DILEPTONS IN NEUTRINO REACTIONS“. In: *Nuclear Physics B* 108, S. 483–513.
- Seul, Gerhild (2009). *Properties of elementary particles*. translated by Stana Radic, Jana Kraus, Originaltitel: Praktikumsversuche zur Einführung in die Hochenergiephysik, Universität Bonn, 1977.
- Weisskopf, V. F. (1990). „Probleme der Popularisierung der modernen Physik“. In: *Physik Journal, Phys. Blätter* 46, S. 73–76.
- <http://pixabay.com> (2012). Tag der Recherche: 13.06.2015. URL: <http://pixabay.com/en/camera-silhouette-pictogram-traffic-34441/>.
- (2014). Tag der Recherche: 13.06.2015. URL: <http://pixabay.com/en/lamp-pear-light-bulb-light-378369/>.
- https://www.snolab.ca/sites/default/files/couppbubble_large.jpg (2015). Tag der Recherche: 01.07.2015.
- <http://www.isgtw.org> (2015). Tag der Recherche: 01.07.2015. URL: http://www.isgtw.org/sites/default/files/img_2012/domen2.JPG.
- <http://www.symmetrymagazine.org/> (2006). „Lylie Fisher: Beauty bubbles through“. In: *symmetry*. URL: <http://www.symmetrymagazine.org/sites/default/files/legacy/pdfs/200612/gallery.pdf>.

Anhang

A	Einführung in die Blasenkammer	87
B	Technik-Hilfsblatt	107
C	Arbeitsblätter	111
C.1	Aufbau der Blasenkammer	112
C.2	Arbeitsblatt zur Teilchenidentifikation	113
C.3	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2644	117
C.4	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2650	119
C.5	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2670	121
C.6	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2691	124
C.7	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2722	127
C.8	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2811	130
C.9	Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2830	133
D	Lösungen	137
D.1	Lösungen zum Aufbau der Blasenkammer	137
D.2	Lösungen zur Teilchenidentifikation	138
D.3	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2644	142
D.4	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2650	144
D.5	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2670	146
D.6	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2691	149
D.7	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2722	152
D.8	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2811	155
D.9	Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2830	158
	Erklärung	163

A Einführung in die Blasenkammer

Einführung in die Blasenkammer



Eine Blasenkammer ist ein Teilchendetektor. Man kann sie auch als „Auge der Teilchenphysiker“ bezeichnen, da es mit ihr möglich ist, die Spuren von Teilchen zu betrachten und so Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Teilchen zu ziehen oder sogar neue Teilchen zu entdecken!

Wie eine Blasenkammer aufgebaut ist und wie Spuren auf Blasenkammeraufnahmen identifiziert werden können, lernst du auf den folgenden Seiten.

Viel Spaß beim Entdecken!

Die Blasenkammer und das Bier

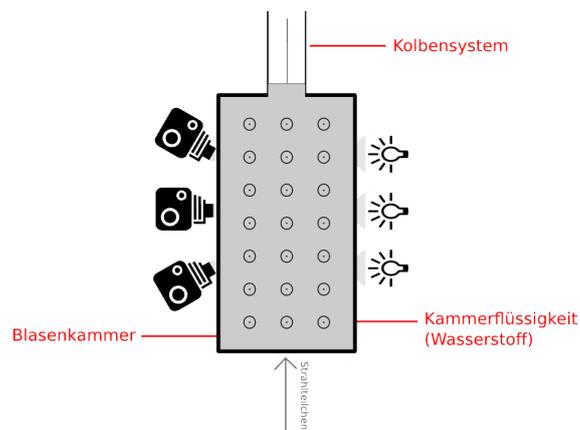


Donald Glaser, 1960, Quelle:<http://imglib.lbl.gov/>

Donald Glaser erfand die Blasenkammer im Jahr 1952 und erhielt dafür bereits 1960 den Nobelpreis.

Einer Sage nach kam er auf die Idee, die Blasenkammer zu erfinden, als er im Bier aufsteigende Blasen beobachtete.

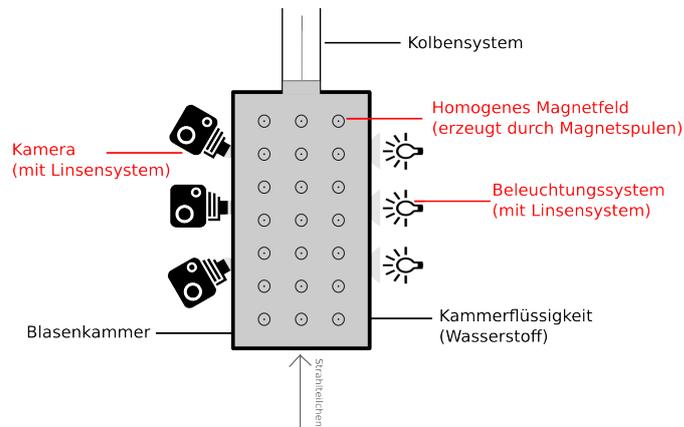
Aufbau der Blasenkammer



In der Abbildung ist der schematische Aufbau einer Blasenkammer dargestellt (nicht maßstabsgetreu). Die Kammer selbst besteht aus einem zylindrischen Behälter, welcher mit einer Kammerflüssigkeit gefüllt ist (hier grau dargestellt, allerdings in der Realität farblos). Die Blasen­kammer, deren Aufnahmen wir im Folgenden betrachten, war mit Wasserstoff gefüllt.

An die Kammer ist ein Kolben angeschlossen, mithilfe dessen das Volumen der Kammer plötzlich vergrößert werden kann. Dadurch wird die Flüssigkeit überhitzt. Durchqueren nun elektrisch geladene Teilchen die Kammer, bilden sich entlang ihrer Spuren kleine Dampf­bläschen. Nach diesem Phänomen ist diese Art von Teilchendetektor benannt. Elektrisch neutrale Teilchen hinterlassen keine Spur in der Kammer.

Aufbau der Blasenkammer



Die Kammer ist umgeben von Magnetspulen (nicht abgebildet), die innerhalb der Kammer ein homogenes Magnetfeld erzeugen. Dieses zeigt in der Abbildung aus der Bildebene heraus, symbolisiert durch



Durch das Magnetfeld werden elektrisch geladene Teilchen, welche die Kammer durchqueren über die Lorentzkraft auf gekrümmte Bahnen gezwungen. Da die Krümmungsrichtung abhängig vom Vorzeichen der elektrischen Ladung ist, können aufgrund der Krümmungsrichtung elektrisch positiv und elektrisch negativ geladene Teilchen voneinander unterschieden werden.

Damit die Spuren der Teilchen beobachtet werden können, ist an die Blasenkammer ein optisches System aus Linsen, Blitzlampen und Kameras angebracht, mit deren Hilfe die Teilchenbahnen fotografiert werden.

Nach dem Fotografieren wird die Kammerflüssigkeit wieder komprimiert und die Blasen verschwinden. Nun kann der Prozess wieder von vorn beginnen.

Und was hat Franckenstein damit zu tun?

Zu Beginn des Einsatzes von Blaskammern zu Forschungszwecken sind alle Auswertungen der Aufnahmen per Hand erfolgt. Da dies sehr aufwändig war, wurden Maschinen zur Arbeitserleichterung entwickelt.

Die erste erfolgreich eingesetzte Maschine konnte automatisch Spuren nachverfolgen und so vermessen. Diese Maschine ist von Jack V. Franck entwickelt worden und erhielt den Spitznamen „Franckenstein“, da einer Legende zufolge der Physiker Arthur Rosenfeld beim ersten Anblick der Maschine so entsetzt von deren äußerem Erscheinungsbild war, dass er sie als „Monster“ bezeichnete.



Franckenstein Quelle: Luis W. Alvarez, Recent developments in particle physics Nobel Lecture, December 11, 1968, S.262

Und wie sieht die Blasenkammer jetzt wirklich aus?



"'BigEuropeanBubbleChamber'". Licensed under CCBY-SA3.
O via Wikimedia Commons - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Big_European_Bubble_Chamber.jpg#/media/File:Big_European_Bubble_Chamber.jpg



"'BlasenKammer-BubbleChamber'". by Eric Wüstenhagen is licensed under a Creative Commons license:
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/> https://www.flickr.com/photos/eriwst/4107411980/File:4107411980_5199839c19_m.jpg



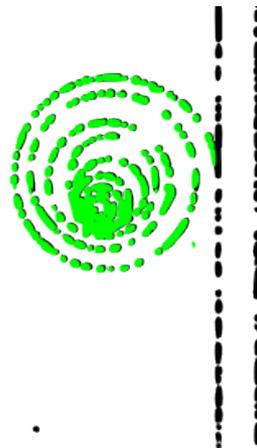
"'BubbleChamber-fnal'". Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons - <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BubbleChamber-fnal.jpg#/media/File:BubbleChamber-fnal.jpg>

Auf den Bildern kannst du drei Blasenkammern von außen sehen. Ganz oben ist die BEBC (Big European Bubble Chamber) des Cern zu sehen. In der Mitte ist eine Blasenkammer von Desy abgebildet. Das unterste Foto zeigt die 15-Fuß-Blasenammer des Fermilab.

Diese Blasenammern sind heute alle nicht mehr in Gebrauch. Es werden allerdings wieder Blasenammern eingesetzt, um nach Dunkler Materie zu suchen.

Du fragst dich vielleicht, warum auf den Fotos dieser Blasenammern keine der Komponenten zu sehen ist, die du auf den vorherigen Seiten kennengelernt hast? Damit in einer Blasenammer Teilchenspuren sichtbar gemacht werden können, sind noch viele weitere Komponenten notwendig, die die eigentliche Kammer umgeben: Zum Beispiel Kühlsysteme, denn Wasserstoff ist bei Atmosphärendruck (ca. 1 bar) erst ab 14,01 K ($-259,14^\circ\text{C}$) flüssig.

Das Elektron



Die grün hervorgehobene Spur stammt von ein Elektron, welches durch Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Elektronen befinden sich in der Flüssigkeit der Blasenkammer. Die Strahlteilchen (Protonen), die die Blasenkammer auf allen Bildern von unten nach oben durchqueren, können Elektronen aus den Molekülen der Kammerflüssigkeit herauslösen.

Die Blasenkammer ist von einem homogenen Magnetfeld umgeben, welches aus der Bildebene herausragt. Da die Elektronen bewegte Ladungsträger sind, wirkt die Lorentzkraft auf sie und ihre Spur ist nach links gekrümmt (Rechte-Hand-Regel).

Achtung: Die Spuren sind auf den Aufnahmen im Original nicht farbig. Sie sind hier nur zur besseren Sichtbarkeit hervorgehoben.

Wann ist ein Elektron sichtbar?

In der Blaskammer sind nur die Spuren bewegter elektrisch geladener Teilchen sichtbar. Ein Teilchen aus der Kammerflüssigkeit wird daher erst sichtbar, wenn es durch die Wechselwirkung mit einem anderen Teilchen einen von Null verschiedenen Impuls erhält.

Das Compton-Elektron



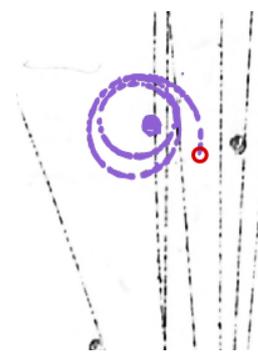
Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron, welches durch Compton-Streuung aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Elektronen können aber auch durch Compton-Streuung, also durch Wechselwirkung mit einem Photon, aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst werden.

In diesem Fall gibt es keine Spur, die zu dem Ursprungsvertex (Ursprungspunkt) der Spirale hinführt, da Photonen keine Spur in der Blasenkammer hinterlassen.

Elektronen, die aufgrund von Compton-Streuung sichtbar sind, werden im Folgenden auch als Compton-Elektronen bezeichnet.

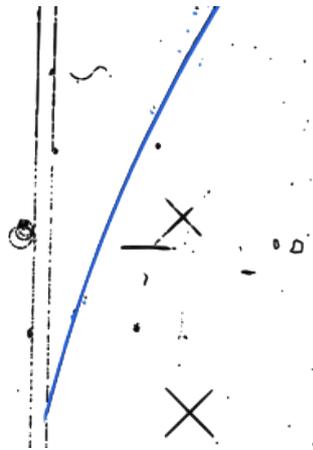
Was ist ein Vertex?



Der Vertex ist rot gekennzeichnet.

Ein Vertex ist ein Wechselwirkungspunkt (in der Blasenkammer). Die Strahlteilchen durchqueren die Blasenkammer und wechselwirken mit der Kammerflüssigkeit (Wasserstoff) zum Beispiel durch Compton-Streuung. Dadurch kann ein Elektron genügend Energie erhalten, um das Wasserstoffatom zu verlassen, und wird so in der Blasenkammer sichtbar. Der Punkt, an dem die Wechselwirkung stattgefunden hat ist auch der Punkt, an welchem die Spur des Elektrons beginnt. Dieser Punkt wird als Wechselwirkungspunkt oder auch als Vertex bezeichnet.

Das Proton

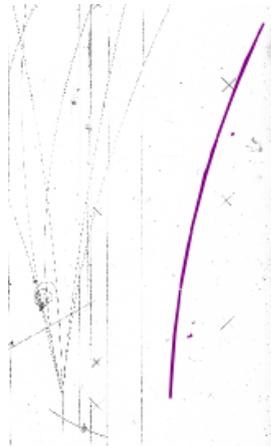


Die blau hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, welches durch Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen (Proton) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Protonen befinden sich in der Kammerflüssigkeit der Blasenammer. Die Strahlteilchen, die die Blasenammer auf allen Bildern von unten nach oben durchqueren, können Protonen aus den Molekülen der Kammerflüssigkeit herauslösen.

Die Blasenammer ist von einem homogenen Magnetfeld umgeben, welches aus der Bildebene herausragt. Da die Protonen bewegte Ladungsträger sind, wirkt auf sie die Lorentzkraft und ihre Spur ist nach rechts gekrümmt (Rechte-Hand-Regel).

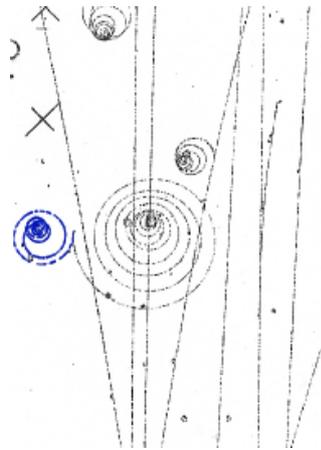
Das Proton



Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, welches durch Wechselwirkung mit einem Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Protonen können auch durch Neutronen aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst werden. In diesem Fall gibt es keine Spur, die zu dem Ursprungsvortex (Ursprungspunkt) der Protonenspur hinführt, da Neutronen keine Spur in der Blasen-kammer hinterlassen.

Das Positron



Die blau hervorgehobene Spur hinterließ ein Positron. Es ist Teil eines Elektron-Positron-Paares, das aus der Umwandlung eines Photons entstand.

Positronen sind nicht in der Kammerflüssigkeit vorhanden, sie müssen also erst entstehen, bevor sie eine Spur hinterlassen können.

Positronen entstehen durch die Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar.

Da alle Ladungen, also auch die elektrische Ladung, erhalten sein müssen, kann ein Positron aus einem Photon nur als Teil eines Elektron-Positron-Paares entstehen. In diesem Fall gibt es keine Spur, die zu dem Ursprungsvortex (Ursprungspunkt) der Spirale hinführt, da Photonen keine Spur in der Blaskammer hinterlassen.

Neutrale Teilchen - sichtbar oder nicht?



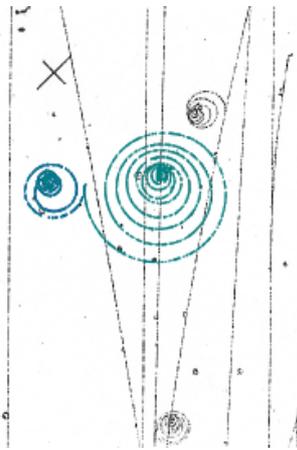
Hier ist ein Proton sichtbar, das durch ein Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Elektrisch neutrale Teilchen selbst sind in der Blasenkammer nicht sichtbar, weil sie keine elektrische Ladung besitzen. Somit sind sie nicht in der Lage, Moleküle der Kammerflüssigkeit zu ionisieren und so zur Blasenbildung beizutragen.

Die anderen Ladungen (schwache und starke Ladung) spielen für die Sichtbarkeit in der Blasenkammer keine Rolle.

Elektrisch neutrale Teilchen können in der Blasenkammer jedoch indirekt beobachtet werden. Sobald sie sich in zwei (oder mehr Teilchen) mit elektrischer Ladung umwandeln, sind die Spuren der entsprechenden Teilchen sichtbar. Die Spuren dieser Teilchen scheinen dann „aus dem Nichts“ zu kommen. Da aufgrund der Impulserhaltung aber in jedem Punkt die (vektorielle) Summe der Impulse aller Teilchen in diesem Punkt erhalten sein muss, können so elektrisch neutrale Teilchen indirekt beobachtet werden. Wird der Impulserhalt an einem Vertex überprüft und scheint nicht erfüllt zu sein, so ist dies ein Zeichen dafür, dass ein elektrisch neutrales Teilchen an dem Prozess am Vertex beteiligt war. Dieses Teilchen besitzt den fehlenden Impuls.

Das Photon

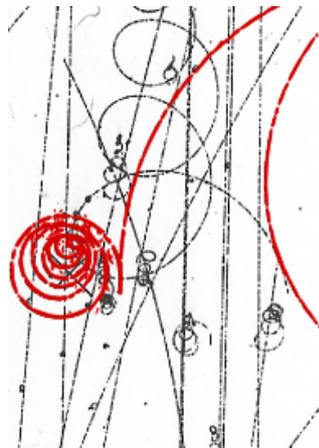


Die türkis hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron-Positron-Paar, das durch die Umwandlung eines Photons entstanden ist.

Ein Photon selbst ist in der Blasenkammer nicht sichtbar, da es elektrisch neutral ist. Ein Photon kann aber indirekt beobachtet werden. Hierzu werden die Spuren der elektrisch geladenen Teilchen genutzt, die bei seiner Umwandlung oder Wechselwirkung entstehen.

Ein Photon kann sich zum Beispiel in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln. Durch vektorielles Addieren der Impulse des Elektrons und des Positrons kann über die Impulserhaltung der Impuls des Photons berechnet werden.

Das Photon



Die rot hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron-Positron-Paar, das durch die Umwandlung eines Photons entstanden ist.

Die Krümmung der Spuren der Teilchen, die bei der Umwandlung eines Photons entstehen, hängt über die Formel $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ von deren Impuls ab. Auch wenn die Krümmungsradien unterschiedlich sind, kann es sich dennoch um ein Elektron-Positron-Paar handeln, da die beiden Teilchen nicht den gleichen Impuls erhalten müssen.

In diesem Fall besaß das Positron einen größeren Impuls und somit auch einen größeren Krümmungsradius als das Elektron. Die Spur des Positrons führt aus dem Bild hinaus.

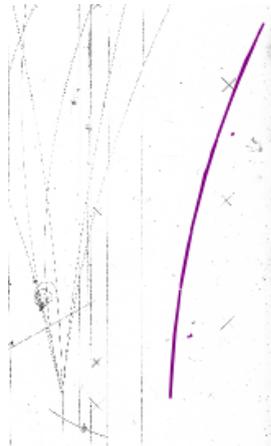
Das Photon



Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Elektron, welches durch Compton- Streuung, also durch ein Photon, aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Ein Photon kann auch mittels Compton-Streuung mit einem Elektron wechselwirken und so indirekt beobachtet werden.

Das Neutron



Die violett hervorgehobene Spur hinterließ ein Proton, welches durch ein Neutron aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden ist.

Ein Neutron ist in der Blasenkammer nicht sichtbar, da es elektrisch neutral ist. Ein Neutron kann aber indirekt beobachtet werden. Hierzu werden die Teilchen genutzt, die bei seiner Wechselwirkung mit anderen Teilchen entstehen.

Ein Photon kann zum Beispiel mit einem Proton aus der Kammerflüssigkeit wechselwirken. Dadurch wird das Proton aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst und erhält einen Impuls, sodass seine Spur in der Blasenkammer sichtbar wird.

Und sonst noch?



Es gibt noch viele weitere Dinge, die sich in der Blasenkammer beobachten lassen. In dieser Einführung hast du Spuren von der Teilchen kennengelernt, die du für die grundlegenden Blasenkammeraufnahmen benötigst.

Auf dem Blasenkammerbild links zum Beispiel siehst du ein Pion, (rot hervorgehobene Spur), Myon (grün hervorgehobene Spur) zerfällt. Das Myon wiederum zerfällt in ein Positron (gelb hervorgehobene Spur).

Diese und weitere Prozesse kannst du in den Blasenkammermaterialien für erhöhtes Anforderungsniveau erkunden.

B Technik-Hilfsblatt

Technik-Hilfsblatt

Dies ist eine Übersicht über die wichtigsten Befehle und Werkzeuge in GeoGebra, die du zum Bearbeiten der Blasenkameraaufnahmen benötigst. Die Auflistung erfolgt in alphabetischer Reihenfolge.

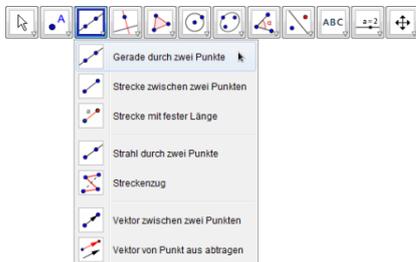
Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Hinweise	1
2	Gerade	1
3	Kreis durch drei Punkte	2
4	Radius	2
5	Streckenzug	3
6	Tangenten	3
7	Vektoraddition	4

1 Allgemeine Hinweise

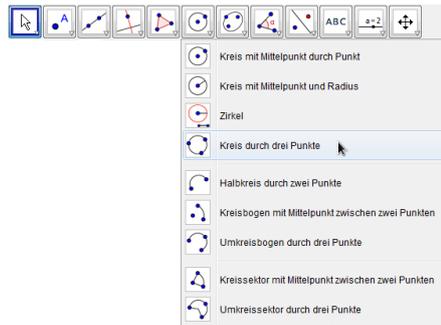
- Um das Arbeitsblatt zu bearbeiten, immer den Mauszeiger in der Werkzeugleiste auswählen
- Dezimalzahlen mit Punkt eingeben, also zum Beispiel **13.23** statt 13,23
- Eingaben in den Eingabefeldern mit Enter bestätigen
- vor dem Scrollen einmal in das Bild klicken

2 Gerade



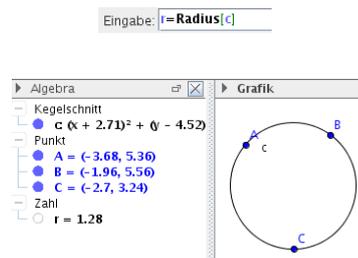
- „Gerade“ auswählen (im 3. Werkzeug von links)
- Zwei Punkte auswählen (GeoGebra erzeugt eine Gerade durch die beiden Punkte)
- Die Gerade wird unter der Kategorie „Gerade“ im Algebrafenster (links) angezeigt
- Nutze dieses Werkzeug für Tangenten an Streckenzügen

3 Kreis durch drei Punkte



- „Kreis durch drei Punkte“ auswählen (im 6. Werkzeug von links)
- Dreimal auf den gewünschten Kreis klicken (GeoGebra erzeugt drei Punkte und einen Kreis durch diese)
- Der Kreis wird unter der Kategorie „Kegelschnitt“ im Algebrafenster (links) angezeigt
- Achte beim Einsatz dieses Werkzeuges für die Blasenkammeraufnahmen darauf, dass du immer den größten Radius einer Spur bestimmst, wenn dieser nicht konstant ist (z.B. bei einer Spirale)

4 Radius



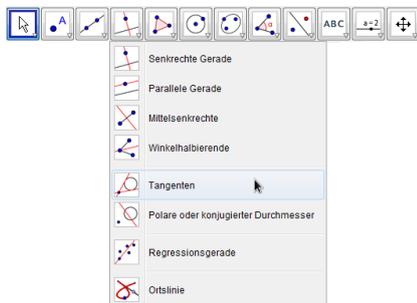
- Eingabe des Befehls „r=Radius[]“ in die Eingabezeile erzeugt den Radius des Objektes in den eckigen Klammern in der Zahl r
→ Eingabe von „r=Radius[c]“ erzeugt also den Radius von c in der Zahl r

5 Streckenzug



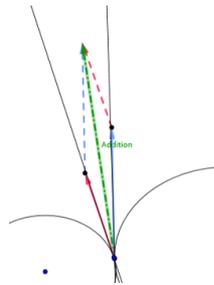
- Die Länge einer Spur ist die Reichweite des Teilchens
- „Streckenzug“ auswählen (im 3. Werkzeug von links)
- Auf ein Ende der Spur klicken
- Spur durch Anklicken bis zum anderen Ende verfolgen
- Letzten Punkt auf anderes Ende der Spur setzen
- Streckenzug durch Anklicken des ersten Punktes beenden
- Der Streckenzug wird mit Längenangabe unter der Kategorie „Streckenzug“ im Algebrafenster (links) angezeigt

6 Tangenten



- „Tangenten“ auswählen (im 4. Werkzeug von links)
- Kreis und Punkt auswählen, die von Tangente berührt werden sollen
- Die Tangente wird unter der Kategorie „Gerade“ im Algebrafenster (links) angezeigt
- Soll eine Tangente an einen Streckenzug gelegt werden, so ersetzt eine Gerade durch zwei Punkte des Streckenzuges die Tangente an dieser Stelle

7 Vektoraddition



- Verwende das Werkzeug „Tangenten“ für Kreise und das Werkzeug „Gerade“ für Streckenzüge
- Ziehe die bereitgestellten Vektoren auf die Tangenten bzw. Geraden
- Die Vektoren stellen die Impulse dar, daher muss die Länge der Vektoren im gleichen Verhältnis stehen, wie die ermittelten Impulse

C Arbeitsblätter

C.1 Aufbau der Blasenkammer

Name: _____ Datum: _____

Der Aufbau der Blasenkammer

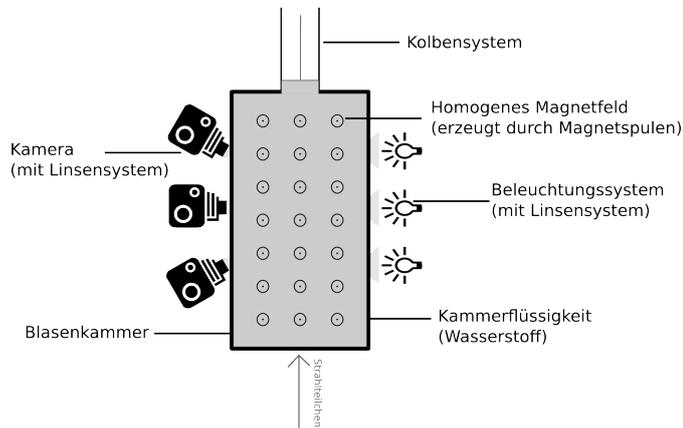


Abbildung 1: Aufbau der Blasenkammer

- **Aufgabe 1: Funktionsweise einer Blasenkammer**

Erkläre die Aufgaben der einzelnen Bestandteile.

- **Aufgabe 2: Verwendung der Blasenkammer**

Erkläre, wofür eine Blasenkammer genutzt werden kann.

C.2 Arbeitsblatt zur Teilchenidentifikation

Name: _____

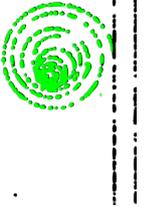
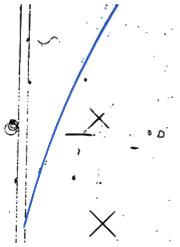
Datum: _____

Teilchenidentifikation in der Blasenkammer

Elektrisch geladene Teilchen

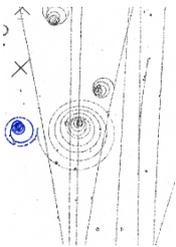
Elektrisch geladene Teilchen hinterlassen Spuren in der Blasenkammer.

Achtung: Die Spuren sind auf den Aufnahmen im Original nicht farbig. Sie sind hier nur zur besseren Sichtbarkeit hervorgehoben.

Spur in der Blasenkammer	Identifiziertes Teilchen	Prozess	Erkennungsmerkmale
			
			
			

Name: _____

Datum: _____

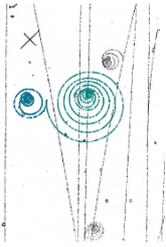
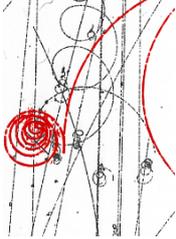
			
			

Name: _____

Datum: _____

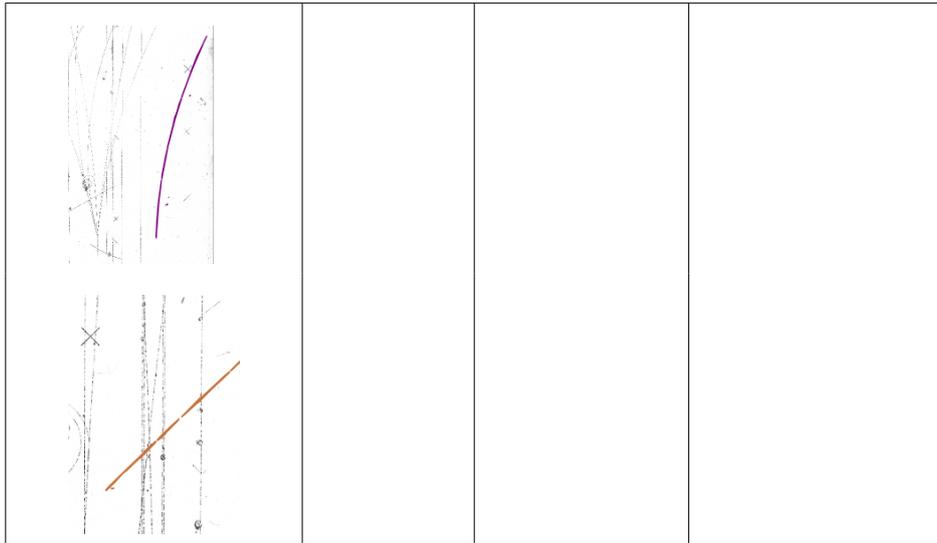
Elektrisch neutrale Teilchen

Elektrisch neutrale Teilchen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar. Es ist aber möglich, aufgrund der Spuren von elektrisch geladenen Teilchen Rückschlüsse auf elektrisch neutrale Teilchen zu ziehen.

Spur in der Blasenkammer	Rückschluss auf welches neutrale Teilchen	Prozess	Erkennungsmerkmale
			
			
			

Name: _____

Datum: _____



C.3 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2644

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2644

Bearbeite die Aufgaben auf dem digitalen Arbeitsblatt und notiere deine Antworten. Falls du die falsche Antwort angeklickt hast, lies den entsprechenden Tipp und überlege erneut.

• **Aufgabe 1**

Entscheide, welches Teilchen die grün hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Positron
- Photon
- Neutron

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 2**

Entscheide, welches Teilchen die rot hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Positron
- Photon
- Neutron

Begründe deine Entscheidung!

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die rot hervorgehobene Spur sichtbar ist.

- Compton-Streuung
 Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron
 Umwandlung eines Photons
 Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
 Wechselwirkung Neutron mit Proton

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 4**

Jetzt geht es darum, den Impuls des Teilchens zu ermitteln, das die rot hervorgehobene Spur hinterlassen hat.

Ermittle zunächst den Krümmungsradius der rot hervorgehobenen Spur.

Gib den Wert auf eine Nachkommastelle genau an.

Der Krümmungsradius beträgt $r =$ _____ cm¹.

• **Aufgabe 5**

Ermittle nun p , den Betrag des Impulses des Teilchens aus dem Radius der Spur.

Die Magnetfeldstärke beträgt $B = 1,74$ T.

Gib den Wert auf drei Nachkommastellen genau an.

$p =$ _____ $\frac{\text{GeV}}{c}$

Stelle deinen Rechenweg dar.

¹Der Maßstab GeoGebra-Einheiten:cm ist 1:1

C.4 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2650

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2650

Bearbeite die Aufgaben auf dem digitalen Arbeitsblatt und notiere deine Antworten. Falls du die falsche Antwort angeklickt hast, lies den entsprechenden Tipp und überlege erneut.

• **Aufgabe 1**

Entscheide, welche elektrische Ladung das Teilchen besitzt, das die orange farbene Spur hinterlassen hat.

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- positive Ladung
- negative Ladung
- keine Ladung

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 2**

Die blau und die orange hervorgehobene Spur stammen jeweils von einem Teilchen.

Entscheide, welches die größere Geschwindigkeit besitzt.

- blaue Spur
- gleiche Geschwindigkeit
- orange farbene Spur

Begründe deine Entscheidung!

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

Entscheide, welches Teilchen die grün hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Positron
- Neutron
- Photon

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 4**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die grün hervorgehobene Spur sichtbar ist.

- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

C.5 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2670

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2670

Dies ist eine Übung zur Blasenkammeraufnahme 2670. Die Blasenkammeraufnahme stammt von der 2m Blasenammer am CERN. Die Strahlteilchen bewegen sich auf der Aufnahme vom unteren zum oberen Bildrand. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

In dieser Übung sollen Impulse und Geschwindigkeiten verschiedener Teilchen verglichen werden. Du entscheidest selbst, welche Spuren du konkret auswählst.

Bearbeite die Aufgaben direkt auf der Blasenkammeraufnahme auf diesem Arbeitsblatt. Du kannst das digitale Arbeitsblatt zusätzlich für Berechnungen nutzen und um in das Bild hineinzu-zoomen (dazu musst du einmal auf das digitale Arbeitsblatt klicken).

- **Aufgabe 1**

Markiere zwei Spuren, die von Elektronen stammen. Begründe, warum diese Spuren von Elektronen stammen.

- **Aufgabe 2**

Vergleiche die Geschwindigkeiten der Elektronen, die die markierten Spuren hinterlassen haben. Begründe deine Aussage.

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

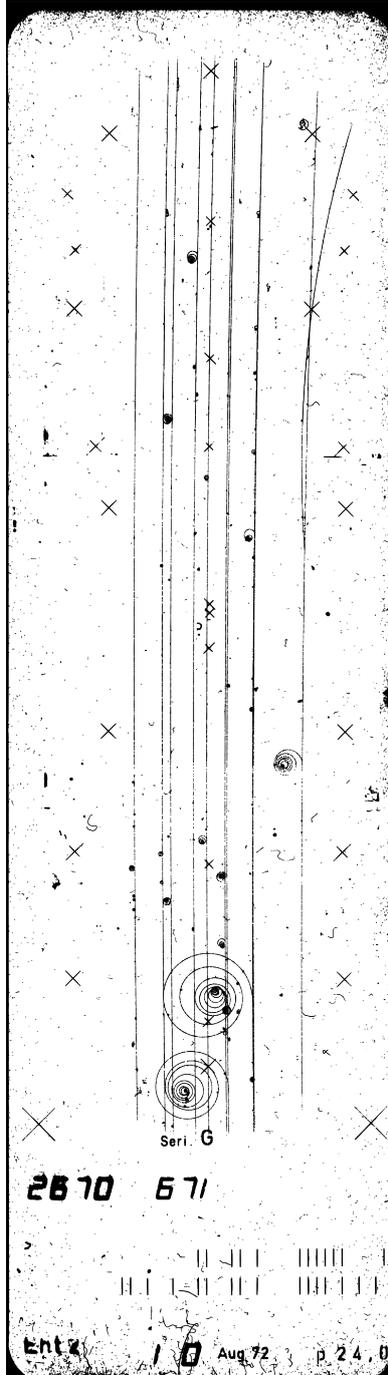
Markiere nun die Spur eines Teilchens mit positiver elektrischer Ladung und begründe, warum die Spur von einem Teilchen mit positiver elektrischer Ladung stammt.

• **Aufgabe 4**

Vergleiche den Impuls und die Geschwindigkeit des positiven Teilchens mit einem der Elektronen und begründe deine Aussagen.

Name: _____

Datum: _____



C.6 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2691

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2691

Bearbeite die Aufgaben auf dem digitalen Arbeitsblatt und notiere deine Antworten. Falls du die falsche Antwort angeklickt hast, lies den entsprechenden Tipp und überlege erneut. Nutze auch dein Technik-Hilfsblatt.

• Aufgabe 1

Entscheide, welches Teilchen die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Neutron
- Photon
- Positron

Begründe deine Entscheidung!

• Aufgabe 2

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die blau und die orange hervorgehobene Spur sichtbar sind.

- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

Die blau und die orange hervorgehobene Spur stammen jeweils von einem Teilchen.
Entscheide, welches die größere Geschwindigkeit besitzt.

- blaue Spur
 orange farbene Spur
 gleiche Geschwindigkeit

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 4**

Die beiden hervorgehobenen Spuren gehen vom gleichen Vertex aus.

Bestimme jeweils den größten Radius der Spuren.

Gib die Werte auf eine Nachkommastelle gerundet an.

Radius blau = _____ cm ¹

Radius orange = _____ cm

¹Der Maßstab GeoGebra-Einheiten:cm ist 1:1

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 5**

Berechne nun die Impulse der Teilchen aus den ermittelten Radien.

Die Magnetfeldstärke beträgt $B = 1,74 \text{ T}$.

Gib die Werte auf drei Nachkommastellen gerundet an.

Impuls blau = _____ $\frac{\text{GeV}}{c}$

Impuls orange = _____ $\frac{\text{GeV}}{c}$

Stelle deinen Rechenweg dar.

• **Aufgabe 6**

Ermittle nun den Betrag und die Richtung des neutralen Teilchens an diesem Vertex durch Vektoraddition der beiden Impulse.

Begründe deine Schlussfolgerung aus der Vektoraddition.

C.7 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2722

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2722

Bearbeite die Aufgaben auf dem digitalen Arbeitsblatt und notiere deine Antworten. Falls du die falsche Antwort angeklickt hast, lies den entsprechenden Tipp und überlege erneut. Nutze auch dein Technik-Hilfsblatt.

- **Aufgabe 1**

Betrachte die pink und die gelb hervorgehobene Spur. Entscheide, welche der Spuren von einem elektrisch negativ geladenen Teilchen stammt.

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- gelbe Spur
- pinke Spur
- beide Spuren

Begründe deine Entscheidung!

- **Aufgabe 2**

Entscheide, von welchem Teilchen die blau hervorgehobene Spur stammt. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Neutron
- Photon
- Positron

Begründe deine Entscheidung!

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die blau und die grün hervorgehobene Spur sichtbar sind.

- Compton-Streuung
- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 4**

Die grün und die blau hervorgehobene Spur gehen vom gleichen Vertex aus.

Bestimme jeweils den größten Radius der Spuren.

Gib die Werte auf eine Nachkommastelle gerundet an.

Radius grün = _____ cm ¹

Radius blau = _____ cm

¹Der Maßstab GeoGebra-Einheiten:cm ist 1:1

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 5**

Berechne nun die Impulse der Teilchen aus den ermittelten Radien.

Die Magnetfeldstärke beträgt $B = 1,74 \text{ T}$.

Gib die Werte auf drei Nachkommastellen gerundet an.

Impuls grün = _____ $\frac{\text{GeV}}{c}$

Impuls blau = _____ $\frac{\text{GeV}}{c}$

Stelle deinen Rechenweg dar.

• **Aufgabe 6**

Ermittle nun den Betrag und die Richtung des Impulses des Photons an diesem Vertex durch Vektoraddition der beiden berechneten Impulse.

C.8 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2811

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2811

Bearbeite die Aufgaben auf dem digitalen Arbeitsblatt und notiere deine Antworten. Falls du die falsche Antwort angeklickt hast, lies den entsprechenden Tipp und überlege erneut.

• **Aufgabe 1**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die blau hervorgehobene Spur sichtbar ist.

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

• **Aufgabe 2**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die violett hervorgehobene Spur sichtbar ist.

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

Die blau und die violett hervorgehobene Spur stammen jeweils von einem Teilchen.
Entscheide, welches den größeren Impuls besitzt.

- gleicher Impuls
 blaue Spur
 violette Spur

Begründe deine Entscheidung!

Zusatzaufgabe: Begründe, welche Aussage du über die Geschwindigkeit der Teilchen treffen kannst.

• **Aufgabe 4**

Die beiden rot hervorgehobenen Spuren gehen vom gleichen Vertex aus. Ermittle den Impuls der Teilchen, indem du ihre Reichweite bestimmst.
Gib die Reichweite auf eine Nachkommastelle gerundet an.

Reichweite hellrot = _____ cm ¹.

Das entspricht einem Impuls von $p_{\text{hellrot}} = \text{_____} \frac{\text{GeV}}{c}$.

Reichweite dunkelrot = _____ cm.

Das entspricht einem Impuls von $p_{\text{dunkelrot}} = \text{_____} \frac{\text{GeV}}{c}$.

¹Der Maßstab GeoGebra-Einheiten:cm ist 1:1.

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 5**

Ermittle nun, ob zu diesem Vertex auch ein elektrisch neutrales Teilchen gehört.

Addiere dazu die Impulse im Vertex auf dem Bild vektoriell.

Nenne und begründe die Schlüsse, die du aus der Vektoraddition ziehen kannst.

Zu dem Vertex gehört ein elektrisch neutrales Teilchen.

Zu dem Vertex gehört kein elektrisch neutrales Teilchen.

C.9 Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2830

Name: _____

Datum: _____

Arbeitsblatt zur Blasenkammeraufnahme 2830

Dies ist eine Übung zur Blasenkammeraufnahme 2830. Die Blasenkammeraufnahme stammt von der 2 m Blasenkammer am CERN. Die Strahlteilchen bewegen sich auf der Aufnahme vom unteren zum oberen Bildrand. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

In dieser Übung sollen Impulse und Geschwindigkeiten verschiedener Teilchen verglichen werden. Du entscheidest selbst, welche Spuren du konkret auswählst.

Bearbeite die Aufgaben direkt auf der Blasenkammeraufnahme auf diesem Arbeitsblatt. Du kannst das digitale Arbeitsblatt zusätzlich für Berechnungen nutzen und um in das Bild hineinzu-zoomen (dazu musst du einmal auf das digitale Arbeitsblatt klicken).

- **Aufgabe 1**

Markiere die Spur eines Elektrons, welches aufgrund der Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen in der Blasenkammer eine Spur hinterlassen hat.

- **Aufgabe 2**

Markiere die Spur eines Positrons. Nenne den Prozess, aufgrund dessen das Positron in der Blasenkammer sichtbar ist.

Name: _____

Datum: _____

• **Aufgabe 3**

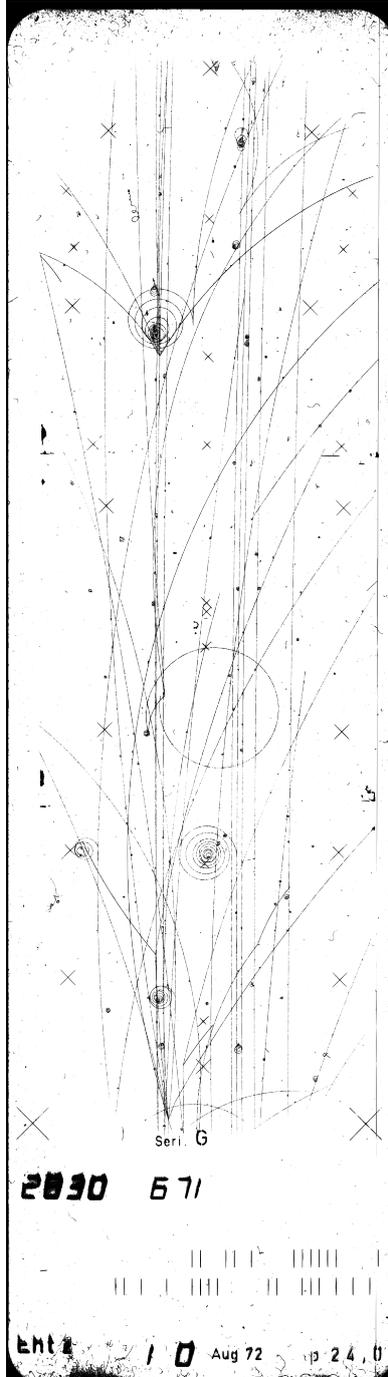
Markiere die Spuren eines Elektron-Positron-Paares, bei welchem das Elektron und das Positron einen stark unterschiedlichen Impuls besitzen. Welches Teilchen besitzt den größeren Impuls?

• **Aufgabe 4**

Betrachte die markierten Spuren des Elektron-Positron-Paares. Ein Teilchen besitzt einen Impuls von $p_1 = 0,029 \frac{\text{GeV}}{c}$, das andere Teilchen besitzt einen Impuls von $p_2 = 0,601 \frac{\text{GeV}}{c}$. Betrachte mittels vektorieller Addition den Impulserhalt am Vertex. Begründe, ob ein neutrales Teilchen an dem Prozess am Vertex beteiligt ist. Falls ja, gib den Betrag des Impulses an und zeichne den Impuls auf deinem Arbeitsblatt ein.

Name: _____

Datum: _____



D Lösungen

D.1 Lösungen zum Aufbau der Blaskammer

Der Aufbau der Blaskammer - Lösungsblatt

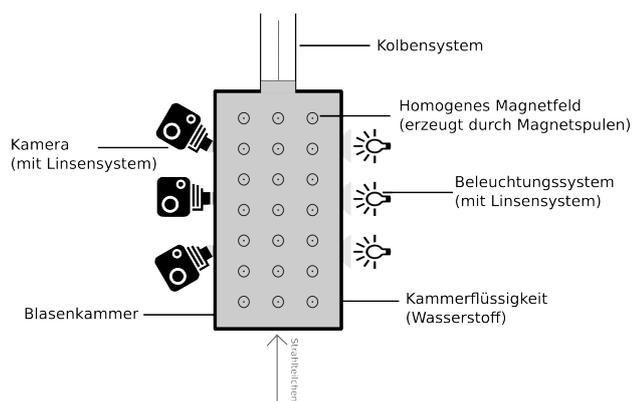


Abbildung 1: Aufbau der Blaskammer

- **Aufgabe 1: Funktionsweise einer Blaskammer**

Erkläre die Aufgabe der einzelnen Bestandteile.

Die Blaskammer beinhaltet die Kammerflüssigkeit. Das Kolbensystem dient zur Veränderung des Kammervolumens. So kann das Volumen vergrößert und die Kammerflüssigkeit überhitzt werden. Spuren von elektrisch geladenen (Elementar-) Teilchen werden sichtbar. Anschließend kann das Volumen wieder verringert werden; die Blasen (also die Spuren) verschwinden wieder. Das Magnetfeld bewirkt eine Krümmung der Spuren der elektrisch geladenen Teilchen abhängig vom Ladungsvorzeichen, sodass die Spurkrümmung Rückschlüsse auf die Ladung des jeweiligen Teilchens erlaubt. Das System aus Linsen, Beleuchtung und Kameras ermöglicht die Fotografie und somit die Auswertung der Spuren in der Kammer.

- **Aufgabe 2: Verwendung der Blaskammer**

Erkläre, wofür eine Blaskammer genutzt werden kann.

Eine Blaskammer kann zum Beobachten von Spuren von Teilchen in einem homogenen Magnetfeld dienen. Spuren von elektrisch geladenen Teilchen können direkt beobachtet werden und es sind Rückschlüsse auf neutrale Teilchen möglich. Eine Blaskammer kann dazu dienen, Eigenschaften von bekannten Teilchen näher zu untersuchen oder unbekannte Teilchen zu suchen und/oder zu finden.

D.2 Lösungen zur Teilchenidentifikation

Name: _____

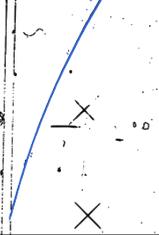
Datum: _____

Teilchenidentifikation in der Blasenkammer

Elektrisch geladene Teilchen

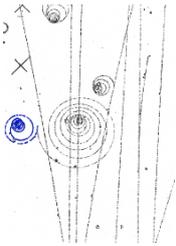
Elektrisch geladene Teilchen hinterlassen Spuren in der Blasenkammer.

Achtung: Die Spuren sind auf den Aufnahmen im Original nicht farbig. Sie sind hier nur zur besseren Sichtbarkeit hervorgehoben.

Spur in der Blasenkammer	Identifiziertes Teilchen	Prozess	Erkennungsmerkmale
	Elektron	Wechselwirkung von Strahlteilchen und Elektron	<ul style="list-style-type: none"> nach links gekrümmte Spur zum Vertex hinführenden Spur eines Strahlteilchens
	Elektron	Compton-Streuung	<ul style="list-style-type: none"> nach links gekrümmte Spur keine zum Vertex hinführenden Spur (Photonen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar)
	Proton	Wechselwirkung von Strahlteilchen und Proton	<ul style="list-style-type: none"> nach rechts gekrümmte Spur zum Vertex hinführenden Spur eines Strahlteilchens

Name: _____

Datum: _____

	Proton	Wechselwirkung von ankommendem Neutron mit Proton aus der Blasenkammer	<ul style="list-style-type: none"> • nach rechts gekrümmte Spur • keine zum Vertex hinführenden Spur (Neutronen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar)
	Positron	Umwandlung eines Photons in eine Elektron-Positron-Paar	<ul style="list-style-type: none"> • nach rechts gekrümmte Spur • keine zum Vertex hinführenden Spur (Photonen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar) • am Vertex ebenfalls Spur eines Elektrons sichtbar (nach links gekrümmt)

Name: _____

Datum: _____

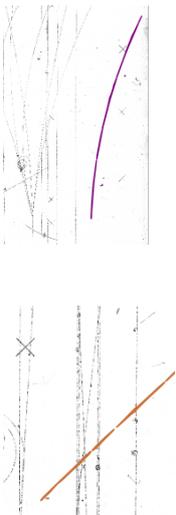
Elektrisch neutrale Teilchen

Elektrisch neutrale Teilchen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar. Es ist aber möglich, aufgrund der Spuren von elektrisch geladenen Teilchen Rückschlüsse auf elektrisch neutrale Teilchen zu ziehen.

Spur in der Blasenkammer	Rückschluss auf welches neutrale Teilchen	Prozess	Erkennungsmerkmale
	<p>Photon</p>	<p>Umwandlung eines Photons in eine Elektron-Positron-Paar</p>	<ul style="list-style-type: none"> • keine zum Vertex hinführenden Spur (Photonen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar) • zwei vom Vertex ausgehende Spuren mit entgegengesetzter Krümmung
	<p>Photon</p>	<p>Compton-Streuung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • keine zum Vertex hinführenden Spur (Photonen sind in der Blasenkammer nicht sichtbar) • vom Vertex ausgehende, nach links gekrümmte Spur

Name: _____

Datum: _____

	Neutron	Wechselwirkung von ankommendem Neutron mit Proton aus der Blaskammer	<ul style="list-style-type: none">• keine zum Vertex hinführenden Spur (Neutronen sind in der Blaskammer nicht sichtbar)• vom Vertex ausgehende, nach rechts gekrümmte Spur
--	---------	--	--

D.3 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2644

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2644

- **Aufgabe 1**

Entscheide, welches Teilchen die grün hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Positron
- Photon
- Neutron

Begründe deine Entscheidung!

Da die grün hervorgehobene Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen positiv elektrisch geladen ist. Da zu der grünen Spur die Spur eines Strahlteilchens hinführt und sich am gleichen Vertex keine Spur, die nach links gekrümmt ist, befindet, kann es kein Positron sein. Ein Positron entsteht nämlich immer gemeinsam mit einem Elektron aus einem (in der Blasenkammer nicht sichtbaren) Photon.

- **Aufgabe 2**

Entscheide, welches Teilchen die rot hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Positron
- Photon
- Neutron

Begründe deine Entscheidung!

Da die rot hervorgehobene Spur nach links gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch negativ geladen ist. Daher handelt es sich um ein Elektron.

• **Aufgabe 3**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die rot hervorgehobene Spur sichtbar ist.

- Compton-Streuung
 Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron
 Umwandlung eines Photons
 Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
 Wechselwirkung Neutron mit Proton

Begründe deine Entscheidung!

Die rot hervorgehobene Spur stammt von einem Elektron (siehe Aufgabe 2). Da zu der rot hervorgehobenen Spur die Spur eines Strahlteilchens hinführt, ist das Elektron durch die Wechselwirkung eines Strahlteilchens mit einem Molekül der Kammerflüssigkeit aus dieser herausgelöst worden.

Bei den anderen beiden Auswahlmöglichkeiten wäre keine hinführende Spur sichtbar, da neutrale Teilchen (hier Photonen) keine Spuren in der Blaskammer hinterlassen.

• **Aufgabe 4**

Jetzt geht es darum, den Impuls des Teilchens zu ermitteln, das die rot hervorgehobene Spur hinterlassen hat.

Ermittle zunächst den Krümmungsradius der rot hervorgehobenen Spur.

Gib den Wert auf eine Nachkommastelle genau an.

Der Krümmungsradius ist $r = \underline{1,8} \text{ cm}^1$.

• **Aufgabe 5**

Ermittle nun p , den Betrag des Impulses des Teilchens aus dem Radius der Spur.

Die Magnetfeldstärke beträgt $B = 1,74 \text{ T}$.

Gib den Wert auf drei Nachkommastellen genau an.

$$p = \underline{0,009} \frac{\text{GeV}}{c}$$

Stelle deinen Rechenweg dar.

Der Impuls lässt sich über die Formel $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ berechnen. Dabei muss die Magnetfeldstärke B in Tesla und der Radius r in Meter eingesetzt werden, um den Impuls p in $\frac{\text{GeV}}{c}$ zu erhalten. $p = 0,3 \cdot 1,74 \text{ T} \cdot 0,0018 \text{ m} \approx 0,009 \frac{\text{GeV}}{c}$

¹Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $0,15 \text{ cm} < r < 0,2 \text{ cm}$ zu. Der Maßstab GeoGebra-Einheiten:cm ist 1:1.

D.4 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2650

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2650

- **Aufgabe 1**

Entscheide, welche elektrische Ladung das Teilchen besitzt, das die orange farbene Spur hinterlassen hat.

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- positive Ladung
- negative Ladung
- keine Ladung

Begründe deine Entscheidung!

Da die orange hervorgehobene Spur nach links gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen, von dem die Spur stammt, elektrisch negativ geladen ist.

- **Aufgabe 2**

Die blau und die orange hervorgehobene Spur stammen jeweils von einem Teilchen.

Entscheide, welches die größere Geschwindigkeit besitzt.

- blaue Spur
- gleiche Geschwindigkeit
- orange farbene Spur

Begründe deine Entscheidung!

Elektronen besitzen eine negative elektrische Ladung. Wenn sie sich in einem Magnetfeld bewegen, wirkt auf sie die Lorentzkraft als Radialkraft. Durch Gleichsetzen der Beträge der beiden Kräfte ergibt sich $p = Q \cdot B \cdot r$. Also bedeutet ein größerer Radius einen größeren Impuls. Der Impuls ist von Ruhemasse und Geschwindigkeit abhängig. Da die Ruhemasse der Elektronen gleich ist, ergibt sich, je größer der Impuls desto größer die Geschwindigkeit. Aus dieser Beziehung folgt: je größer der Radius der Spur am Ursprung der Spur ist, desto größer ist die Geschwindigkeit des Teilchens, von dem die Spur stammt. Da die orange hervorgehobene Spur einen größeren äußeren Radius besitzt, folgt, dass das Elektron, das diese Spur hinterlassen hat, eine größere Geschwindigkeit besitzt.

- **Aufgabe 3**

Entscheide, welches Teilchen die grün hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Positron
- Neutron
- Photon

Begründe deine Entscheidung!

Da die grün hervorgehobene Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen positiv elektrisch geladen ist. Da sich am gleichen Vertex keine Spur, die nach links gekrümmt ist, befindet, kann es kein Positron sein. Ein Positron entsteht nämlich immer gemeinsam mit einem Elektron aus einem (in der Blaskammer nicht sichtbaren) Photon.

- **Aufgabe 4**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die grün hervorgehobene Spur sichtbar ist.

- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

Die grüne Spur stammt von einem Proton (siehe Aufgabe 3). Da zu der grün hervorgehobenen Spur keine Spur hinführt, muss das Proton durch die Wechselwirkung mit einem Neutron (welches in der Blaskammer keine Spur hinterlässt) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden sein. Bei der Umwandlung eines Photons würde ein Elektron-Positron-Paar entstehen, sodass zwei Spuren mit entgegengesetzter Krümmung sichtbar sein müssten. Hier ist aber nur eine Spur sichtbar, sodass keine Umwandlung eines Photons stattgefunden haben kann.

D.5 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2670

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2670

Hinweis: Dieses Lösungsblatt enthält lediglich jeweils eine Lösung für die Aufgaben. Es sind mehrere Lösungen möglich.

- **Aufgabe 1**

Markiere zwei Spuren, die von Elektronen stammen. Begründe, warum diese Spuren von Elektronen stammen.

Die violett und die gelb markierte Spur stammen von Elektronen. Da die Spuren nach links gekrümmt sind, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass die Teilchen elektrisch negativ geladen sind.

- **Aufgabe 2**

Vergleiche die Geschwindigkeiten der Elektronen, die die markierten Spuren hinterlassen haben. Begründe deine Aussage.

Elektronen besitzen eine negative elektrische Ladung. Wenn sie sich in einem Magnetfeld bewegen, wirkt auf sie die Lorentzkraft als Radialkraft. Durch Gleichsetzen der Beträge der beiden Kräfte ergibt sich $p = Q \cdot B \cdot r$. Also bedeutet ein größerer Radius einen größeren Impuls. Der Impuls ist von Ruhemasse und Geschwindigkeit abhängig. Da die Ruhemasse der Elektronen gleich ist, ergibt sich, je größer der Impuls desto größer die Geschwindigkeit. Aus dieser Beziehung folgt: je größer der Radius der Spur am Ursprung der Spur ist, desto größer ist die Geschwindigkeit des Teilchens, von dem die Spur stammt. Da die violett markierte Spur einen größeren äußeren Radius besitzt, folgt, dass das Elektron, das diese Spur hinterlassen hat, eine größere Geschwindigkeit besitzt.

- **Aufgabe 3**

Markiere nun die Spur eines Teilchens mit positiver elektrischer Ladung und begründe, warum die Spur von einem Teilchen mit positiver elektrischer Ladung stammt.

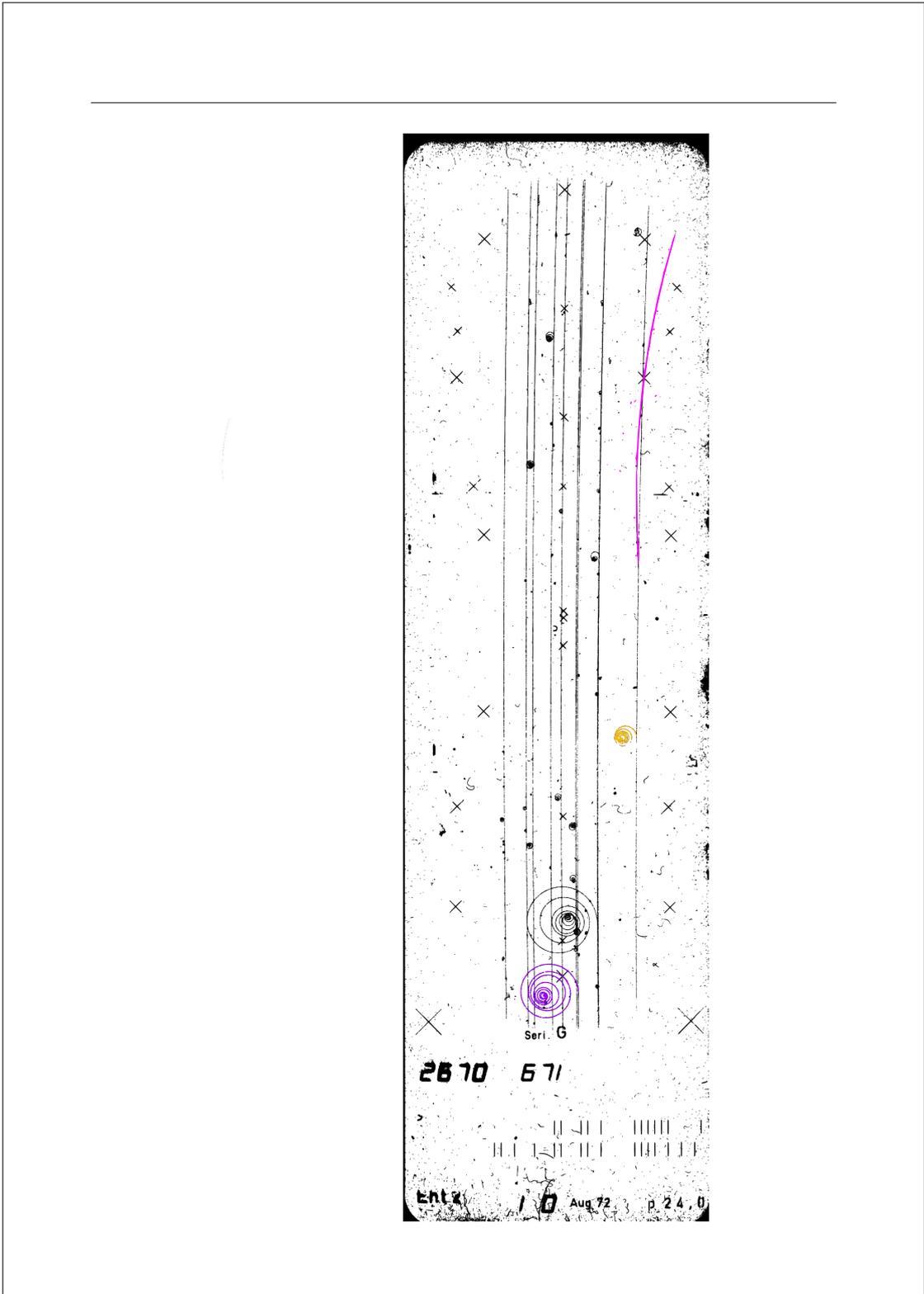
Die pink markierte Spur stammt von einem elektrisch positiv geladenen Teilchen. Da die Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch positiv geladen ist.

- **Aufgabe 4**

Vergleiche den Impuls und die Geschwindigkeit des positiven Teilchens mit einem der Elektronen und begründe deine Aussagen.

Hier werden beispielhaft die violett und die pink hervorgehobene Spur betrachtet. Beide Spuren stammen von bewegten Teilchen, welche eine elektrische Ladung besitzen. Daher wirkt die Lorentzkraft als Radialkraft auf sie. Durch Gleichsetzen der Beträge der beiden Kräfte ergibt sich $p = Q \cdot B \cdot r$. Also bedeutet ein größerer Radius einen größeren Impuls. Daher folgt, dass das Teilchen, das die pink hervorgehobene Spur hinterlassen hat einen größeren Impuls hatte als das Teilchen, das die violett hervorgehobene Spur hinterlassen hat.

Der Impuls ist von Ruhemasse und Geschwindigkeit abhängig. Da hier die pink markierte Spur von einem Proton stammt und die violett markierte Spur von einem Elektron, lässt sich ohne genaue Ermittlung der Impulse keine Aussage über das Verhältnis der Geschwindigkeiten treffen.



D.6 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2691

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2691

- **Aufgabe 1**

Entscheide, welches Teilchen die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Neutron
- Photon
- Positron

Da die blau hervorgehobene Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen positiv elektrisch geladen ist. Da zu der blauen Spur keine Spur eines Strahlteilchens hinführt und sich am gleichen Vertex ebenfalls eine Spur, die nach links gekrümmt ist, befindet, ist das Teilchen ein Positron. Ein Positron entsteht nämlich immer gemeinsam mit einem Elektron aus einem (in der Blasenkammer nicht sichtbaren) Photon. Die Spur am gleichen Vertex, die nach links gekrümmt ist, stammt von dem Elektron.

- **Aufgabe 2**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die blau und die orange hervorgehobene Spur sichtbar sind.

- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Zu den hervorgehobenen Spuren führt keine Spur eines Strahlteilchens hin, weiterhin besitzen die Spuren entgegengesetzte Krümmungsrichtungen, daher besitzen die Teilchen, die die Spuren hinterließen, verschiedene Vorzeichen der elektrischen Ladung.

Daraus folgt, dass die hervorgehobenen Spuren aufgrund der Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar sichtbar sind. Die beiden Spuren stammen von dem Elektron-Positron-Paar.

- **Aufgabe 3**

Die blau und die orange hervorgehobene Spur stammen jeweils von einem Teilchen. Entscheide, welches die größere Geschwindigkeit besitzt.

- blaue Spur
- orange farbene Spur
- gleiche Geschwindigkeit

Die orange hervorgehobene Spur stammt von einem Elektron, die blau hervorgehobene Spur von einem Positron. Elektronen und Positronen besitzen eine elektrische Ladung. Wenn sie sich in einem Magnetfeld bewegen, wirkt auf sie die Lorentzkraft als Radialkraft. Durch Gleichsetzen der Beträge der beiden Kräfte ergibt sich $p = Q \cdot B \cdot r$. Also bedeutet ein größerer Radius einen größeren Impuls. Der Impuls ist von Ruhemasse und Geschwindigkeit abhängig. Da die Ruhemasse von Positronen und Elektronen gleich ist, ergibt sich, je größer der Impuls desto größer die Geschwindigkeit. Aus dieser Beziehung folgt: je größer der Radius der Spur am Ursprung der Spur ist, desto größer ist die Geschwindigkeit des Teilchens, von dem die Spur stammt. Da die orange hervorgehobene Spur einen größeren äußeren Radius besitzt, folgt, dass das Elektron, das diese Spur hinterlassen hat, eine größere Geschwindigkeit besitzt als das Positron, das die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat.

- **Aufgabe 4**

Die beiden hervorgehobenen Spuren gehen vom gleichen Vertex aus. Bestimme jeweils den größten Radius der Spuren. Gib die Werte auf eine Nachkommastelle gerundet an.

$$\text{Radius blau} = \underline{12,1} \text{ cm}^1$$

$$\text{Radius orange} = \underline{13,5} \text{ cm}^2$$

¹Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $11 \text{ cm} \leq \text{Radius blau} \leq 12,8 \text{ cm}$ zu.

²Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $12,9 \text{ cm} \leq \text{Radius orange} \leq 13,7 \text{ cm}$ zu.

- **Aufgabe 5**

Berechne nun die Impulse der Teilchen aus den ermittelten Radien.

Die Magnetfeldstärke beträgt $B = 1,74 \text{ T}$.

Gib die Werte auf drei Nachkommastellen gerundet an.

$$\text{Impuls blau} = \underline{0,063} \frac{\text{GeV}}{c}$$

$$\text{Impuls orange} = \underline{0,070} \frac{\text{GeV}}{c}$$

Stelle deinen Rechenweg dar.

Der Impuls lässt sich über $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ berechnen. Hierzu muss die Magnetfeldstärke B in Tesla und der Radius r in Meter eingesetzt werden, um den Impuls p in $\frac{\text{GeV}}{c}$ zu erhalten.

- **Aufgabe 6**

Ermittle nun den Betrag und die Richtung des neutralen Teilchens an diesem Vertex durch Vektoraddition der beiden Impulse.

Begründe deine Schlussfolgerung aus der Vektoraddition.

Der Betrag des Impulses des neutralen Teilchens ist $0,1327 \frac{\text{GeV}}{c}$, die Richtung ist $(-0,3011; 13,271)$. Da in jedem Punkt, also auch in jedem Vertex der Impuls erhalten sein muss, muss die vektorielle Summe der Impulse der beteiligten Teilchen dem Impuls des neutralen Teilchens entsprechen.

D.7 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2722

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2722

- **Aufgabe 1**

Betrachte die pink und die gelb hervorgehobene Spur. Entscheide, welche der Spuren von einem elektrisch negativ geladenen Teilchen stammt.

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- gelbe Spur
- pinke Spur
- beide Spuren

Da die gelb hervorgehobene Spur nach links gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch negativ geladen ist. Da die pink hervorgehobene Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch positiv geladen ist.

- **Aufgabe 2**

Entscheide, von welchem Teilchen die blau hervorgehobene Spur stammt. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Elektron
- Proton
- Neutron
- Photon
- Positron

Da die blau hervorgehobene Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch positiv geladen ist. Da zu der blauen Spur keine Spur eines Strahlteilchens hinführt und sich am gleichen Vertex ebenfalls eine Spur, die nach links gekrümmt ist, befindet, ist das Teilchen ein Positron. Ein Positron entsteht nämlich immer gemeinsam mit einem Elektron aus einem (in der Blasenkammer nicht sichtbaren) Photon. Die Spur am gleichen Vertex, die nach links gekrümmt ist, stammt von dem Elektron.

• **Aufgabe 3**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die blau und die grün hervorgehobene Spur sichtbar sind.

- Compton-Streuung
 Umwandlung eines Photons
 Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
 Wechselwirkung Neutron mit Proton
 Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Zu den hervorgehobenen Spuren führt keine Spur eines Strahlteilchens hin, weiterhin besitzen die Spuren entgegengesetzte Krümmungsrichtungen, daher besitzen die Teilchen, die die Spuren hinterließen, verschiedene Vorzeichen der elektrischen Ladung.

Daraus folgt, dass die hervorgehobenen Spuren aufgrund der Umwandlung eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar sichtbar sind. Die beiden Spuren stammen von dem Elektron-Positron-Paar.

• **Aufgabe 4**

Die grün und die blau hervorgehobene Spur gehen vom gleichen Vertex aus.

Bestimme jeweils den größten Radius der Spuren.

Gib die Werte auf eine Nachkommastelle gerundet an.

$$\text{Radius grün} = \underline{1,9} \text{ cm}^1$$

$$\text{Radius blau} = \underline{1,9} \text{ cm}^2$$

• **Aufgabe 5**

Berechne nun die Impulse der Teilchen aus den ermittelten Radien.

Die Magnetfeldstärke beträgt $B = 1,74 \text{ T}$.

Gib die Werte auf drei Nachkommastellen gerundet an.

$$\text{Impuls grün} = \underline{0,010} \frac{\text{GeV}}{c}$$

$$\text{Impuls blau} = \underline{0,010} \frac{\text{GeV}}{c}$$

Stelle deinen Rechenweg dar.

Der Impuls lässt sich über $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ berechnen. Hierzu muss die Magnetfeldstärke B in Tesla und der Radius r in Meter eingesetzt werden, um den Impuls p in $\frac{\text{GeV}}{c}$ zu erhalten.

¹Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $1,6 \text{ cm} \leq \text{Radius grün} \leq 2,5 \text{ cm}$ zu.

²Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $1,6 \text{ cm} \leq \text{Radius blau} \leq 2,5 \text{ cm}$ zu.

- **Aufgabe 6**

Ermittle nun den Betrag und die Richtung des Impulses des Photons an diesem Vertex durch Vektoraddition der beiden berechneten Impulse.

Begründe deine Schlussfolgerung aus der Vektoraddition.

Der Betrag des Impulses Photons ist $0,02 \frac{\text{GeV}}{c}$, die Richtung ist $(-0,0309; 2.0064)$. Da in jedem Punkt, also auch in jedem Vertex der Impuls erhalten sein muss, muss die vektorielle Summe der Impulse des Elektrons und des Positrons dem Impuls des Photons entsprechen.

D.8 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2811

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2811

- **Aufgabe 1**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die blau hervorgehobene Spur sichtbar ist.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Umwandlung eines Photons
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung**
- Wechselwirkung Neutron mit Proton
- Wechselwirkung Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

Da die blau hervorgehobene Spur nach links gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch negativ geladen ist. Daher handelt es sich um ein Elektron. Da zu der blau hervorgehobenen Spur keine Spur eines Strahlteilchens hinführt, ist das Elektron durch Wechselwirkung mit einem in der Blasenkammer nicht sichtbaren Photon aus einem Molekül der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden. Dieser Prozess heißt Compton-Streuung

- **Aufgabe 2**

Entscheide, aufgrund welchen Prozesses die violett hervorgehobene Spur sichtbar ist.
Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

- Umwandlung eines Photons
- Stoß Strahlteilchen mit Proton
- Compton-Streuung
- Stoß Neutron mit Proton**
- Stoß Strahlteilchen mit Elektron

Begründe deine Entscheidung!

Da die violett hervorgehobene Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch positiv geladen ist. Da sich am gleichen Vertex keine Spur, die nach links gekrümmt ist, befindet, kann es kein Positron sein. Ein Positron entsteht nämlich immer gemeinsam mit einem Elektron aus einem (in der Blasenkammer nicht sichtbaren) Photon. Da zu der violett hervorgehobenen Spur keine Spur hinführt, muss das Proton durch die Wechselwirkung mit einem Neutron (welches in der Blasenkammer keine Spur hinterlässt) aus der Kammerflüssigkeit herausgelöst worden sein.

• **Aufgabe 3**

Die blau und die violett hervorgehobene Spur stammen jeweils von einem Teilchen. Entscheide, welches den größeren Impuls besitzt.

- gleicher Impuls
 blaue Spur
 violette Spur

Begründe deine Entscheidung!

Die blau hervorgehobene Spur stammt von einem Elektron, die violett hervorgehobene Spur stammt von einem Proton. Elektronen und Protonen besitzen eine elektrische Ladung. Wenn sie sich in einem Magnetfeld bewegen, wirkt auf sie die Lorentzkraft als Radialkraft. Durch Gleichsetzen der Beträge der beiden Kräfte ergibt sich $p = Q \cdot B \cdot r$. Also bedeutet ein größerer Radius einen größeren Impuls. Da die violett hervorgehobene Spur einen größeren äußeren Radius besitzt, folgt, dass das Proton, das diese Spur hinterlassen hat, einen größeren Impuls besitzt als das Elektron, das die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat.

Zusatzaufgabe: Begründe, welche Aussage du über die Geschwindigkeit der Teilchen treffen kannst.

Der Impuls ist von Ruhemasse und Geschwindigkeit abhängig. Da die Ruhemasse von Elektronen und Protonen sehr verschieden ist, kann ohne genaues Ermitteln der Impulse keine Aussage über die Geschwindigkeiten getroffen werden.

• **Aufgabe 4**

Die beiden rot hervorgehobenen Spuren gehen vom gleichen Vertex aus. Ermittle den Impuls der Teilchen, indem du ihre Reichweite bestimmst. Gib die Reichweite auf eine Nachkommastelle gerundet an.

Reichweite hellrot = 9,8 cm¹.

Das entspricht einem Impuls von $p_{\text{hellrot}} = 0,265 \frac{\text{GeV}}{c}$.

Reichweite dunkelrot = 9,0 cm².

Das entspricht einem Impuls von $p_{\text{dunkelrot}} = 0,260 \frac{\text{GeV}}{c}$ ³.

¹Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $9,5 \text{ cm} \leq \text{Reichweite hellrot} \leq 10,2 \text{ cm}$ zu. Der Maßstab GeoGebra-Einheiten:cm ist 1:1.

²Das digitale Arbeitsblatt lässt Werte $8,5 \text{ cm} \leq \text{Reichweite dunkelrot} \leq 9,2 \text{ cm}$ zu.

³Das digitale Arbeitsblatt gibt für $8,5 \text{ cm} \leq \text{Reichweite} \leq 8,6 \text{ cm}$ einen Impuls von $p = 0,255 \frac{\text{GeV}}{c}$ aus.

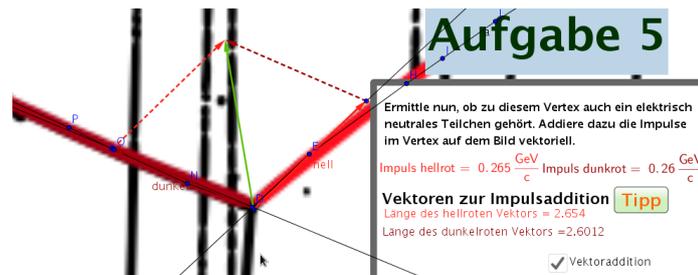
• **Aufgabe 5**

Ermittle nun, ob zu diesem Vertex auch ein elektrisch neutrales Teilchen gehört.

Addiere dazu die Impulse im Vertex auf dem Bild vektoriell.

Nenne und begründe die Schlüsse, die du aus der Vektoraddition ziehen kannst.

Die vektorielle Impulsaddition der Impulse des Teilchens, das die hellrot hervorgehobene Spur hinterlassen hat und des Teilchens, das die dunkelrot hervorgehobene Spur hinterlassen hat, ergibt einen resultierenden Impuls. Aufgrund der Impulserhaltung müssen die Impulse der Teilchen, die vor einer Umwandlung an einem Vertex vorhanden sind, den Impulsen der Teilchen, die nach der Umwandlung an diesem Vertex vorhanden sind, entsprechen. Der ermittelte resultierende Impuls (hier hellgrün) zeigt nicht in die Richtung, in welche die zum Vertex hinführende Spur zeigt. Daher muss an der Umwandlung auch ein elektrisch neutrales, in der Blasenkammer nicht sichtbares, Teilchen beteiligt gewesen sein.



- Zu dem Vertex gehört ein elektrisch neutrales Teilchen
- Zu dem Vertex gehört kein elektrisch neutrales Teilchen.

D.9 Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2830

Lösungen zur Blasenkammeraufnahme 2830

Hinweis: Dieses Lösungsblatt enthält lediglich jeweils eine Lösung für die Aufgaben. Es sind mehrere Lösungen möglich.

- **Aufgabe 1**

Markiere die Spur eines Elektrons, welches aufgrund der Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen in der Blasenkammer eine Spur hinterlassen hat.

Die grün markierte Spur stammt von einem Elektron, welches aufgrund der Wechselwirkung mit einem Strahlteilchen eine Spur in der Blasenkammer hinterlassen hat. Da die Spur nach links gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch negativ geladen ist. Da zu dem Vertex die Spur eines Strahlteilchens hinführt, ist seine Spur aufgrund der Wechselwirkung mit demselben sichtbar.

- **Aufgabe 2**

Markiere die Spur eines Positrons. Nenne den Prozess, aufgrund dessen das Positron in der Blasenkammer sichtbar ist.

Die violett markierte Spur stammt von einem elektrisch positiv geladenen Teilchen. Da die Spur nach rechts gekrümmt ist, folgt mithilfe der Rechten-Hand-Regel, dass das Teilchen elektrisch positiv geladen ist. Ein Positron entsteht in der Blasenkammer immer zusammen mit einem Elektron aus der Umwandlung eines Photons. Das heißt, dass am gleichen Vertex zwei ausgehende Spuren mit entgegengesetzter Krümmungsrichtung vorhanden sein müssen. Da das (elektrisch neutrale) Photon selbst keine Spur in der Blasenkammer hinterlässt, führt keine Spur zum Vertex hin.

- **Aufgabe 3**

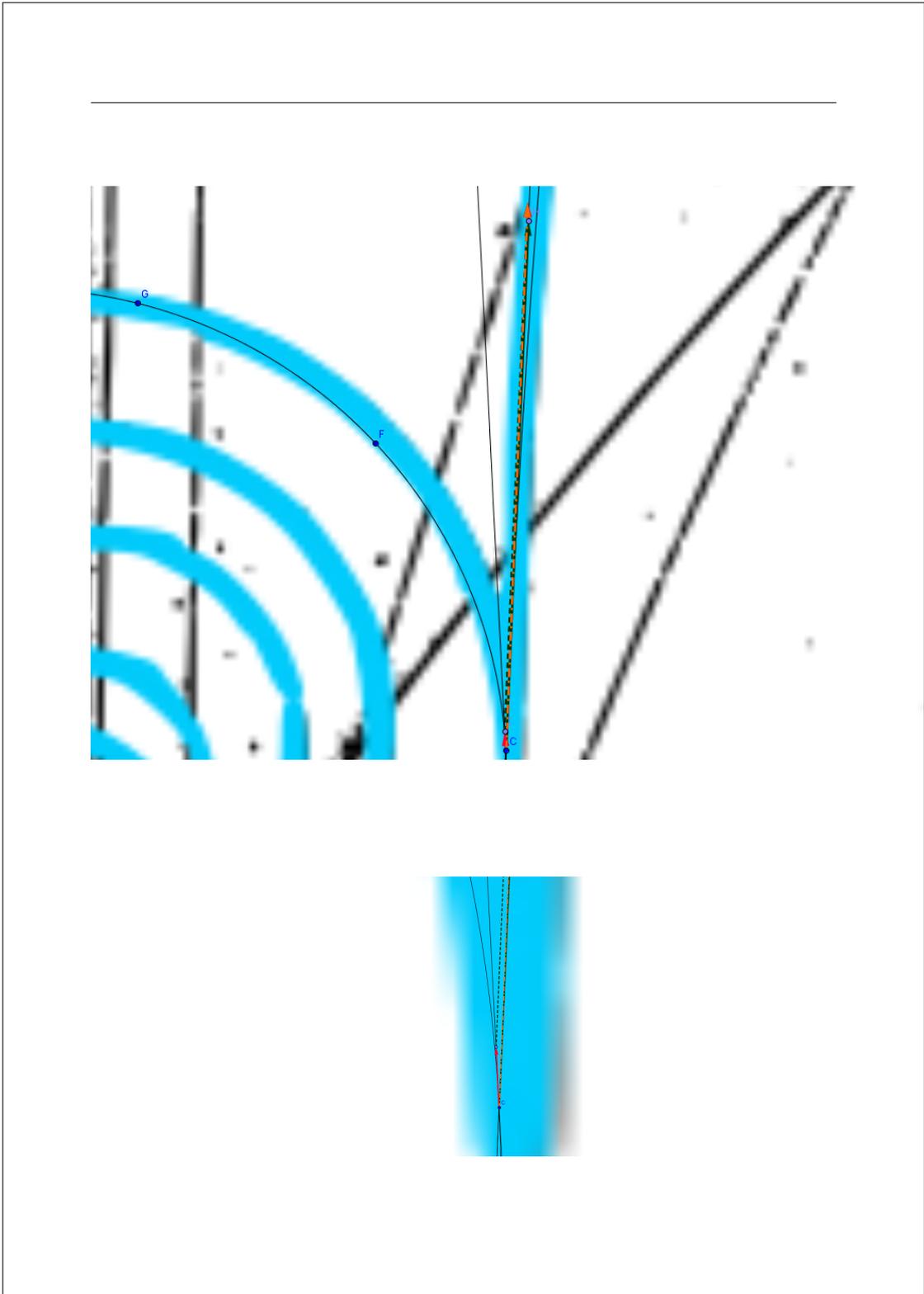
Markiere die Spuren eines Elektron-Positron-Paares, bei welchem das Elektron und das Positron einen stark unterschiedlichen Impuls besitzen. Welches Teilchen besitzt den größeren Impuls?

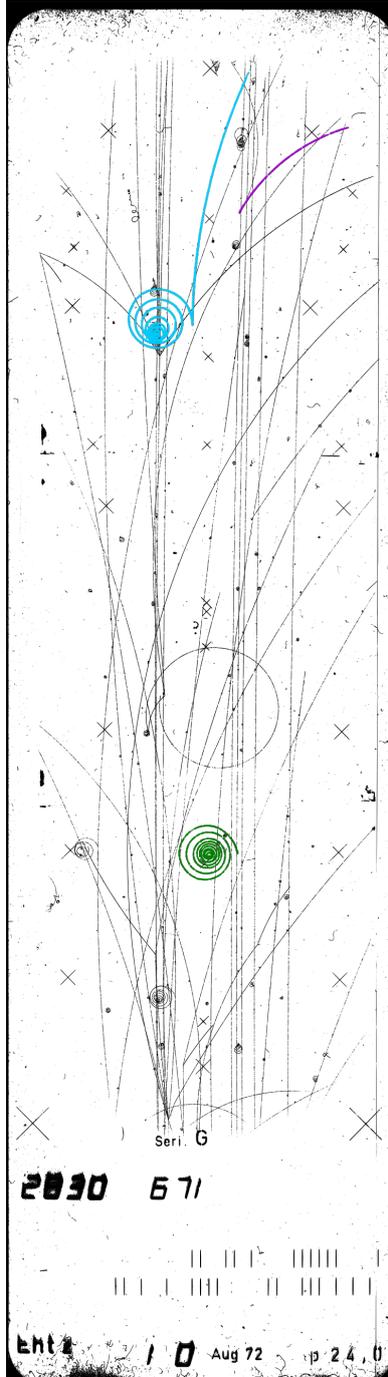
Die hellblau hervorgehobenen Spuren stammen von einem Elektron-Positron-Paar. Das Positron besitzt den größeren Impuls, da der Krümmungsradius der Spur größer ist. Elektronen und Positronen besitzen eine elektrische Ladung. Wenn sie sich in einem Magnetfeld bewegen, wirkt auf sie die Lorentzkraft als Radialkraft. Durch Gleichsetzen der Beträge der beiden Kräfte ergibt sich $p = Q \cdot B \cdot r$. Also bedeutet ein größerer Radius einen größeren Impuls.

- **Aufgabe 4**

Betrachte die markierten Spuren des Elektron-Positron-Paares. Ein Teilchen besitzt einen Impuls von $p_1 = 0,029 \frac{\text{GeV}}{c}$, das andere Teilchen besitzt einen Impuls von $p_2 = 0,601 \frac{\text{GeV}}{c}$. Betrachte mittels vektorieller Addition den Impulserhalt am Vertex. Begründe, ob ein neutrales Teilchen an dem Prozess am Vertex beteiligt ist. Falls ja, gib den Betrag des Impulses an und zeichne den Impuls auf deinem Arbeitsblatt ein.

Da ein Elektron-Positron-Paar aus der Umwandlung eines Photons entsteht, ist an dem Prozess an diesem Vertex auch ein elektrisch neutrales Teilchen beteiligt (das Photon). Da nur vom Vertex ausgehende Spuren sichtbar sind, muss ein elektrisch neutrales Teilchen beteiligt sein. Die vektorielle Addition der Impulse ergibt einen Impulsbetrag von $p_{\text{neutral}} = 0,629 \frac{\text{GeV}}{c}$.





Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Rebecca Schmidt

Dresden, 30. Juli 2015