

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

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

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

# Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf erhöhtem Anforderungsniveau

vorgelegt von

Floria Naumann  
geboren am 15.08.1990

Betreuer/Erstgutachter: Prof. Dr. Michael Kobel  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Gesche Pospiech

Eingereicht am 10.09.2015



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Die Teilchenphysik und das Standardmodell . . . . .	3
2.1.1	Die fundamentalen Wechselwirkungen und die zugehörigen Ladungen . . . . .	4
2.1.2	Die Elementarteilchen . . . . .	8
2.1.3	Zusammengesetzte Teilchen - Hadronen . . . . .	11
2.1.4	Erhaltungssätze bei Wechselwirkungen . . . . .	13
2.1.5	Einheiten in der Teilchenphysik . . . . .	14
2.2	Die Blasenkammer . . . . .	15
2.2.1	Geschichtliche Hintergründe . . . . .	15
2.2.2	Aufbau und Funktionsweise der Blasenkammer . . . . .	16
2.2.3	Geometrische Rekonstruktionen mit den Aufnahmen . . . . .	18
2.3	Auswertung von Blasenkammeraufnahmen . . . . .	22
2.3.1	Teilchenidentifikation . . . . .	23
2.3.2	Impulsberechnung . . . . .	24
2.3.3	Proton-Proton-Streuung . . . . .	30
2.3.4	Streuung von Neutronen an Protonen . . . . .	31
2.3.5	Die Umwandlung des Pions . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Didaktische Analyse</b>	<b>37</b>
3.1	Didaktische Begründung . . . . .	37
3.1.1	Medien im Physikunterricht . . . . .	37
3.1.2	Erzeugung von Motivation durch Authentizität und Kollaboration . . . . .	42
3.1.3	Lernen über die Physik als Wissenschaft . . . . .	44
3.2	Lernvoraussetzungen und Lernziele . . . . .	46
3.2.1	Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau . . . . .	46
3.2.2	Zusammenfassung der Lernvoraussetzungen und Lernziele . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau</b>	<b>51</b>
4.1	Einordnung in die Einheitlichen Prüfungsanforderungen für die Abiturprüfung . . . . .	51
4.2	Technische Voraussetzungen . . . . .	53

4.3	Einbettung in den Unterricht . . . . .	54
4.4	Aufbau und Einsatz der Materialien . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>69</b>
<b>Anhang</b>		<b>71</b>

# 1 Einleitung

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelt sich das Gebiet der Teilchenphysik zu einem großen Forschungsbereich der modernen Physik. Durch technische Weiterentwicklungen der Messmethoden schritt das Vordringen zu immer kleineren Objekten stetig voran. Einen Meilenstein dieser Entwicklungen bildete die Erfindung der Blasenkammer durch Donald A. Glaser im Jahre 1952. In den 60er Jahren gehörte dieser visuelle Detektor zu den wichtigsten Nachweisgeräten für Teilchen. Elektrisch geladene Teilchen hinterlassen in der Blasenkammer Spuren, welche fotografiert werden. Durch die Auswertung der Blasenkammerbilder können Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Teilchen gezogen werden.

Im Rahmen dieser Masterarbeit sind Unterrichtsmaterialien entstanden, welche die Auswertung solcher Blasenkammeraufnahmen thematisieren. Die verwendeten Bilder stammen von der 2 m großen Blasenkammer am CERN. Die Unterrichtsmaterialien sind für den Einsatz im Leistungskurs Physik in der gymnasialen Oberstufe konzipiert und sollen das Wissen der Lernenden im Bereich der Teilchenphysik über die Diskussion der Photonen und Atombausteine (Elektron, Proton und Neutron) hinaus erweitern. Durch die Auswertung der Blasenkammeraufnahmen gewinnen die Schülerinnen und Schüler neue Erkenntnisse im Bereich der Teilchenphysik und wenden bekannte Konzepte auf dieses Fachgebiet an.

In einer weiteren Masterarbeit mit dem Titel „Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau“ von Rebecca Schmidt sind ebenfalls Unterrichtsmaterialien zum Thema Blasenkammer entstanden. Diese zeichnen sich durch ein grundlegendes Anforderungsniveau aus, was den Einsatz im Grundkurs der Oberstufe ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit ist in drei Teile gegliedert: Zunächst werden die benötigten physikalischen Grundlagen erläutert. Dieses Kapitel eignet sich insbesondere auch als Hintergrundinformation für Lehrende, welche die Materialien im Unterricht einsetzen möchten. Im Anschluss daran erfolgt die didaktische Analyse der erstellten Materialien. Es werden dabei auch die übergeordneten Lernvoraussetzungen und Lernziele dargelegt. Im letzten Teil wird ein Überblick über die Unterrichtsmaterialien und die Einsatzmöglichkeiten dieser im Unterricht gegeben.

Die Materialien setzen sich aus digitalen und analogen Bestandteilen zusammen. Die analogen Arbeitsblätter befinden sich im Anhang, während die digitalen GeoGebra-Applets online zur Verfügung gestellt werden. Außerdem sind sämtliche Materialien auf der beiliegenden CD gespeichert.



## 2 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Hintergründe und Grundlagen, welche für die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Materialien relevant sind, diskutiert. Im ersten Teil erfolgt dazu ein kurzer Überblick über die Teilchenphysik und das Standardmodell der Teilchenphysik. Im Anschluss daran wird speziell auf die Physik der Blaskammer eingegangen; insbesondere auf deren Funktionsweise und die für die Materialien entscheidenden Methoden der Auswertung von Blaskammeraufnahmen.

### 2.1 Die Teilchenphysik und das Standardmodell

Die Frage nach dem Aufbau der uns umgebenden Materie ist eine der Grundfragen der Naturwissenschaften. Innerhalb der Physik entwickelte sich dabei die Disziplin der Teilchenphysik, welche die Eigenschaften von und Wechselwirkungen zwischen den Teilchen, also den „Bausteinen“ der Materie, untersucht. Die Physikerinnen und Physiker sind bei ihren Forschungen zu immer kleineren Strukturen vorgestoßen. Davon ausgehend, dass alle Materie aus Atomen aufgebaut ist, wurde nach und nach deren Substruktur erforscht. Letztendlich gelangte man dabei zu den Elementarteilchen, den unteilbaren Strukturen. Die moderne Teilchenphysik, welche sich mit eben diesen Elementarteilchen befasst, hat sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt (vgl. Netzwerk Teilchenwelt 2015, S.27). In diesem Zeitraum wurde beispielsweise erkannt, dass Protonen und Neutronen aus Quarks zusammengesetzt sind. Quarks sind Elementarteilchen, ebenso Elektronen und die ihnen zugeordneten Elektron-Neutrinos. Ein Überblick über alle Elementarteilchen, welche in der heutigen Teilchenphysik bekannt sind, wird in Kapitel 2.1.2 gegeben. Es stellt sich die Frage, ob genau diese heute als elementar angesehenen Teilchen nicht doch aus weiteren, kleineren Teilchen aufgebaut sind. Aus theoretischen Berechnungen ergibt sich beispielsweise für das Elektron, dass dann seine Masse eine Millionen Mal größer sein müsste (vgl. ebd., S. 30). Ähnlich verhält es sich auch bei den Quarks.

Wie in jedem physikalischen Teilgebiet sind Theorie und Experiment auch in diesem Fachgebiet eng gekoppelt. Anlass für aktuelle Forschungen in der Teilchenphysik ist die Bestrebung, alle die Elementarteilchen betreffenden Phänomene mit einer einzigen Theorie beschreiben zu können. Derzeit bildet das Standardmodell der Teilchenphysik, welches seit 1978 in Experimenten immer wieder bestätigt wurde (vgl. Griffiths 1996, S. 4), das Theoriegerüst der Teilchenphysik.

Es ist bisher gewissermaßen nur eine Sammlung und noch keine Vereinigung mehrerer Theorien: der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung<sup>1</sup> und der Quantenchromodynamik<sup>2</sup>. Es beschreibt damit drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen, welchen die Elementarteilchen aufgrund ihrer Ladungen unterliegen. Die vierte fundamentale Wechselwirkung ist die Gravitation. Im folgenden Abschnitt werden die fundamentalen Wechselwirkungen erläutert und die Zusammenhänge dieser zu den Ladungen der Elementarteilchen dargelegt.

### 2.1.1 Die fundamentalen Wechselwirkungen und die zugehörigen Ladungen

Zur Erklärung aller Vorgänge in der Natur, welche bisher beobachtet wurden, sind die vier fundamentalen Wechselwirkungen

- die Gravitation,
- die elektromagnetische Wechselwirkung,
- die schwache Wechselwirkung und
- die starke Wechselwirkung

ausreichend. So kann der Umlauf der Planeten um die Sonne mithilfe der Gravitation verstanden werden. Auch das Fallen von Gegenständen auf der Erde ist durch diese Wechselwirkung erklärbar. Viele andere Phänomene aus dem Alltag basieren auf der elektromagnetischen Wechselwirkung, wie beispielsweise die Kommunikation mittels elektromagnetischer Wellen, das Ausrichten einer Kompassnadel im Erdmagnetfeld oder die chemische Bindung zwischen Atomen. Die schwache und die starke Wechselwirkung können im Alltag nicht direkt beobachtet werden, aber die Auswirkungen dieser Wechselwirkungen sind dennoch von großer Bedeutung. Die starke Wechselwirkung ist beispielsweise dafür verantwortlich, dass es stabile Atomkerne gibt. Sie sorgt dafür, dass es eine Anziehung zwischen den Quarks gibt, aus welchen die Kernbausteine Proton und Neutron bestehen. Die schwache Wechselwirkung ist dafür verantwortlich, dass beispielsweise in der Sonne Kernfusion stattfinden kann. Aufgrund der schwachen Wechselwirkung wandelt sich ein Proton in ein Neutron um.

Wie bereits erläutert, werden durch das Standardmodell der Teilchenphysik drei der vier Wechselwirkungen beschrieben. Da die Gravitation bisher nicht mit den anderen Wechselwirkungen vereinheitlicht werden konnte, ist sie im Standardmodell nicht enthalten. Sie beeinflusst die Wechselwirkung zwischen den Elementarteilchen aufgrund ihrer geringen Massen allerdings kaum. Jede der drei Wechselwirkungen, welche im Standardmodell beschrieben werden, wird

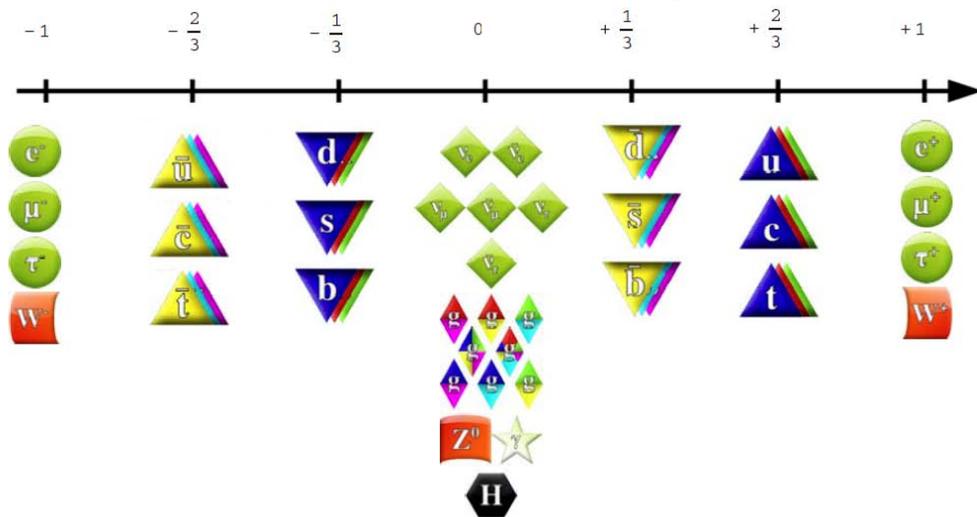
---

<sup>1</sup>Diese Theorie wurde von Abdus Salam, Sheldon Glashow und Steven Weinberg entwickelt und sie erhielten 1979 den Nobelpreis dafür. In dieser Theorie werden die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung vereinheitlicht beschrieben.

<sup>2</sup>Die Quantenchromodynamik beschreibt die starke Wechselwirkung.

eine Ladung zugeordnet. Man unterscheidet damit die elektrische Ladung, die schwache Ladung und die starke Ladung. Nur wenn ein Teilchen die entsprechende Ladung besitzt, unterliegt es der zugehörigen Wechselwirkung. Ladungen sind somit, neben beispielsweise der Masse<sup>3</sup>, fundamentale Eigenschaften der Teilchen und charakterisieren sie.

Die elektrische Ladung ist wohl die bekannteste der drei Ladungsarten. Jedem Teilchen kann eine elektrische Ladungszahl  $q$  als Eigenschaft zugeordnet werden. Bei den Elementarteilchen des Standardmodells treten für die Ladungszahlen die Werte  $-1$ ,  $-\frac{2}{3}$ ,  $-\frac{1}{3}$ ,  $0$ ,  $+\frac{1}{3}$ ,  $+\frac{2}{3}$  und  $+1$  auf.



**Abbildung 2.1:** Elektrische Ladungszahlen der Elementarteilchen: Leptonen werden durch Kreise bzw. Quadrate und Quarks durch Dreiecke symbolisiert. Außerdem sind die Botenteilchen dargestellt. Eine Zusammenstellung aller Elementarteilchen erfolgt in Kapitel 2.1.2. Quelle: Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 93.

Die Ladungszahl  $q = 0$  bedeutet dabei, dass das Teilchen keine elektrische Ladung besitzt und somit der elektromagnetischen Wechselwirkung nicht unterliegt. Bei Teilchen, die aus mehreren Elementarteilchen zusammengesetzt sind, müssen die einzelnen Ladungszahlen addiert werden. Auf diese Weise erhält man deren Ladungszahl. Beispielsweise ergibt sich für ein Proton, welches aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark zusammengesetzt ist,

$$q_p = q_u + q_u + q_d = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

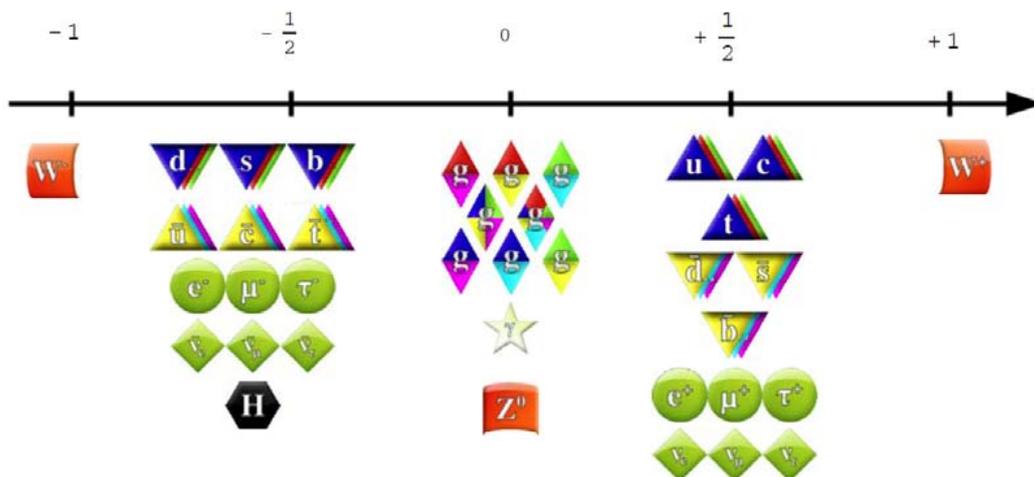
als elektrische Ladungszahl. Bei der elektrischen Ladung ist es auch üblich die Ladung  $Q$  eines Teilchens

$$Q = q \cdot e$$

<sup>3</sup>In dieser Arbeit und in den Materialien bezieht sich der Begriff „Masse“ stets auf die Ruhemasse eines Teilchens und wird mit dem Formelzeichen  $m$  abgekürzt.

anzugeben, um die Stärke der Ladung zu verdeutlichen. Dabei ist  $e$  die Elementarladung. Anhand des Vorzeichens der Ladungszahl ist erkennbar, wie es mit einem anderen Teilchen in Wechselwirkung tritt. Besitzen die elektrischen Ladungszahlen von zwei Teilchen das gleiche Vorzeichen, so stoßen sich die Teilchen ab. Haben die elektrischen Ladungszahlen der beiden Teilchen entgegengesetzte Vorzeichen, so ziehen sie sich an. Neben dieser anziehenden und abstoßenden Wechselwirkung, kann es auch zu Teilchenumwandlungen aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung kommen. Dabei muss die Summe der elektrischen Ladungszahlen erhalten bleiben (siehe Kapitel 2.1.4). Die Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung, deren Auswirkungen im Alltag spürbar sind, ist unbegrenzt.

Neben der elektrischen Ladungszahl kann einem Teilchen außerdem eine schwache Ladungszahl  $I$  zugeordnet werden.



**Abbildung 2.2:** Schwache Ladungszahlen der Elementarteilchen: Als Werte der schwachen Ladungszahlen bei Elementarteilchen treten  $-1$ ,  $-\frac{1}{2}$ ,  $0$ ,  $+\frac{1}{2}$  und  $+1$  auf. Quelle: Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 93.

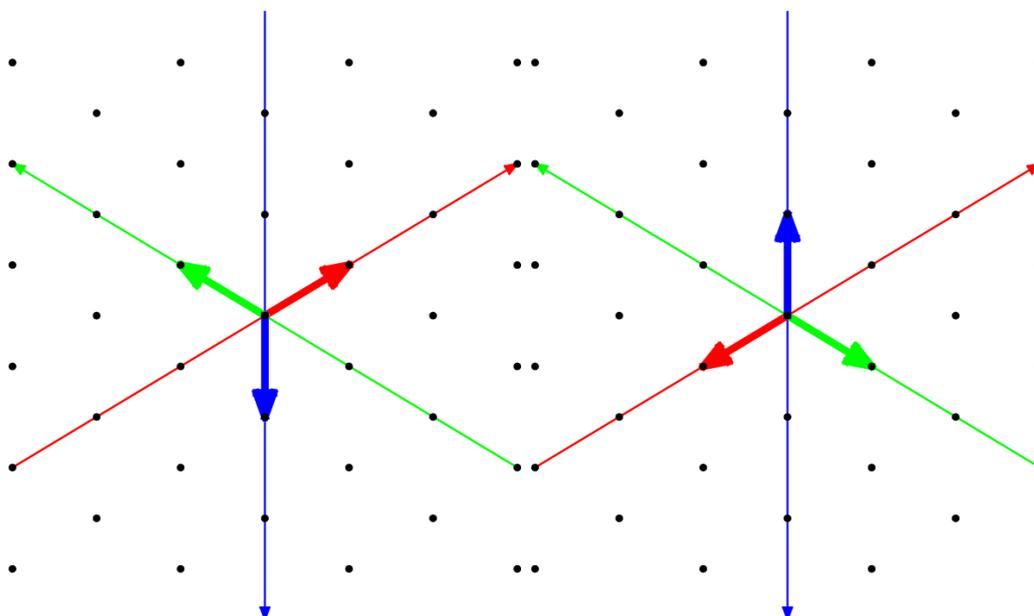
Für zusammengesetzte Systeme gilt wiederum, dass ihre schwache Ladungszahl die Summe der schwachen Ladungszahlen der Bestandteile ist. Die schwache Ladungszahl eines Protons ist demnach

$$I_p = I_u + I_u + I_d = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = +\frac{1}{2}.$$

Ähnlich wie bei der elektrischen Ladung, entscheidet auch bei der schwachen Ladung das Ladungsvorzeichen über die Art der Wechselwirkung eines Teilchens mit einem anderen Teilchen. Besitzen beide Teilchen schwache Ladungszahlen mit gleichen Vorzeichen, so stoßen sie sich ab. Bei entgegengesetzten Vorzeichen der schwachen Ladungszahlen hingegen kann sowohl

Anziehung als auch Abstoßung vorliegen<sup>4</sup>. Die schwache Wechselwirkung besitzt lediglich eine Reichweite von  $2 \cdot 10^{-18}$  m. Teilchenumwandlungen aufgrund der schwachen Wechselwirkung sind ebenso wie bei der elektromagnetischen Wechselwirkung unter Erhaltung der Summe der Ladungszahlen möglich (siehe Kapitel 2.1.4).

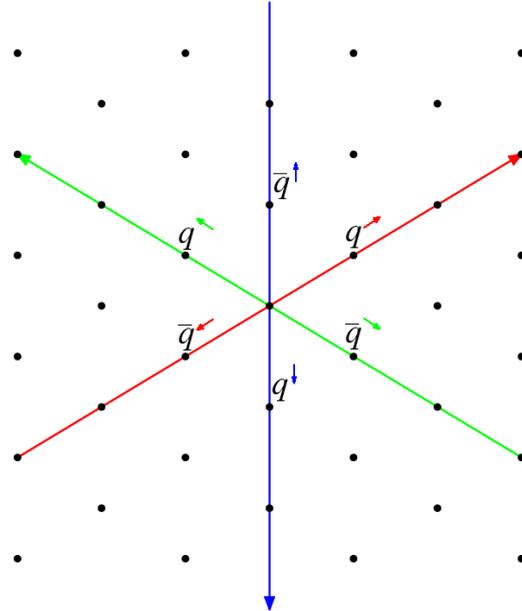
Die starke Ladung wird nicht durch eine Ladungszahl charakterisiert, sondern durch einen Ladungsvektor. Dieser wird auch als Farbladungsvektor bezeichnet. Von den Elementarteilchen besitzen lediglich die Quarks und die Botenteilchen der starken Wechselwirkung (siehe Kapitel 2.1.2) diese Ladung. Die anderen Elementarteilchen unterliegen also nicht dieser Wechselwirkung. Es gibt drei verschiedene Farbladungsvektoren mit den Bezeichnungen „rot“, „grün“ und „blau“, welche in einem sogenannten Farbgitter veranschaulicht werden können. Zu jedem der drei Farbladungsvektoren gibt es den entsprechenden Gegenvektor, den Anti-Farbladungsvektor.



**Abbildung 2.3:** Farbladungsvektoren (links) und Anti-Farbladungsvektoren (rechts) im ebenen Farbgitter: Die drei Farbladungsvektoren entsprechen den Einheitsvektoren entlang der drei Achsen, welche jeweils einen Winkel von  $120^\circ$  einschließen. Die Anti-Farbladungsvektoren sind die zugehörigen Gegenvektoren. Quelle: Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 53.

Quarks kommen mit allen drei Farbladungsvektoren vor. Die Anti-Quarks kommen entsprechend mit den drei Anti-Farbladungsvektoren vor. Im Farbgitter kann dies dadurch veranschaulicht werden, dass den Quarks bzw. Anti-Quarks die Gitterpunkte zugeordnet werden, an denen ihre Farbladungsvektoren enden.

<sup>4</sup>Für eine genaue Betrachtung muss beachtet werden, dass die schwache Ladung der dritten Komponente des schwachen Isospins, einer vektoriellen Größe, entspricht. Entscheidend für die Abstoßung oder Anziehung von zwei Teilchen ist das Vorzeichen des quantenmechanischen Skalarprodukts der beiden schwachen Isospinvektoren.



**Abbildung 2.4:** Gitterpunkte der Quarks im Farbgitter: Einem Quark bzw. Anti-Quark wird der Gitterpunkt zugeordnet, an dem sein Farbladungsvektor endet. Quelle: Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 54.

Für zusammengesetzte Teilchen, die man beobachtet, gilt, dass sie stets so aus Quarks zusammengesetzt sind, dass sie insgesamt keine Farbladung tragen. Die Farbladungsvektoren der Quarks addieren sich dabei zum Nullvektor. Ein Proton kann also beispielsweise aus einem Up-Quark mit roten Farbladungsvektor, einem Up-Quark mit blauem Farbladungsvektor und einem Down-Quark mit grünem Farbladungsvektor zusammengesetzt sein. Es sind auch Vertauschungen der Farbladungen möglich. Entscheidend ist nur, dass jeder Farbladungsvektor einmal vorkommt.

Die starke Ladung ist also für die Anziehung oder Abstoßung der stark geladenen Quarks untereinander verantwortlich. Aufgrund des Vektorcharakters der starken Ladung ist eine Diskussion, welche Farbladungskombinationen zu Anziehung bzw. Abstoßung führen, kompliziert. Die Reichweite der starken Wechselwirkung beträgt etwa  $2 \cdot 10^{-15}$  m.

### 2.1.2 Die Elementarteilchen

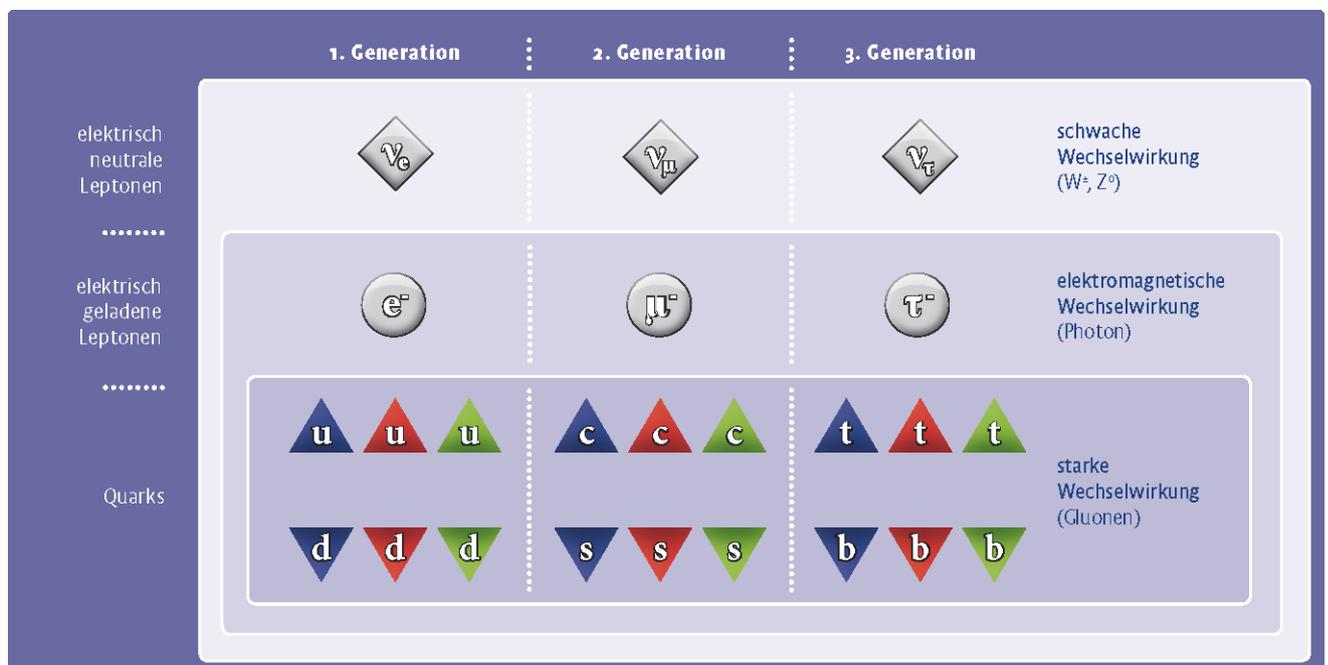
Im Standardmodell ist neben der Beschreibung der drei fundamentalen Wechselwirkungen auch die Beschreibung der Elementarteilchen enthalten. Dazu zählen nach heutigem Stand die Quarks, die Leptonen, die Botenteilchen und das Higgs-Teilchen. Die Quarks und Leptonen bilden die elementaren Materieteilchen. Im folgenden soll auf die Ordnung dieser Teilchen eingegangen werden. Die Botenteilchen dienen der Beschreibung der Wechselwirkungen durch den Austausch von eben diesen Teilchen. Auch diese Teilchen sollen kurz vorgestellt werden. Anhand ihrer Eigenschaften lassen sich die Materieteilchen ordnen. Zu diesen Eigenschaften zählen die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Ladungen und die Masse. Nicht alle

Elementarteilchen besitzen alle drei Ladungsarten. Dadurch ergibt sich ein erstes Ordnungskriterium. Man kann feststellen, dass

- alle Materieteilchen der schwachen Wechselwirkung,
- Quarks und Leptonen der elektromagnetischen Wechselwirkung und
- nur die Quarks der starken Wechselwirkung

unterliegen. Die Ladungen sind allerdings nicht ausreichend, um die Elementarteilchen zu ordnen, weil einige von ihnen sich in ihren Ladungen gleichen, wie beispielsweise das Elektron und das Myon. Beide besitzen die elektrische Ladungszahl  $q = -1$ , die schwache Ladungszahl  $I = -\frac{1}{2}$  und keine starke Ladung.

Das zweite Ordnungskriterium ist die Masse, anhand derer man die Elementarteilchen in sogenannte Generationen einteilt. Das Elektron und das Myon, welche sich wie eben gezeigt nicht durch ihre Ladungen unterscheiden, besitzen sehr unterschiedliche Massen. So beträgt die Masse des Elektrons etwa  $m_e = 0,5 \frac{\text{MeV}}{c^2}$  und die Masse des Myons etwa  $m_\mu = 106 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ <sup>5</sup>. Insgesamt sind drei Generationen der Materieteilchen bekannt. Das dritte Teilchen, welches ebenfalls die gleichen Ladungen besitzt wie das Elektron und das Myon, ist das Tauon. Seine Masse beträgt etwa  $m_\tau = 1777 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ . Ordnet man nun alle Materieteilchen nach ihrer Ladung und teilt sie in die drei Generationen ein, dann ergibt sich das folgende Schema:



**Abbildung 2.5:** Ordnungsschema der Materieteilchen: Die Teilchen sind nach ihren Massen (von links nach rechts zunehmend) und den Wechselwirkungen, an welchen sie teilnehmen, geordnet. Quelle: Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 91.

<sup>5</sup>In Kapitel 2.1.5 wird die hier genutzte Einheit für die Masse erläutert.

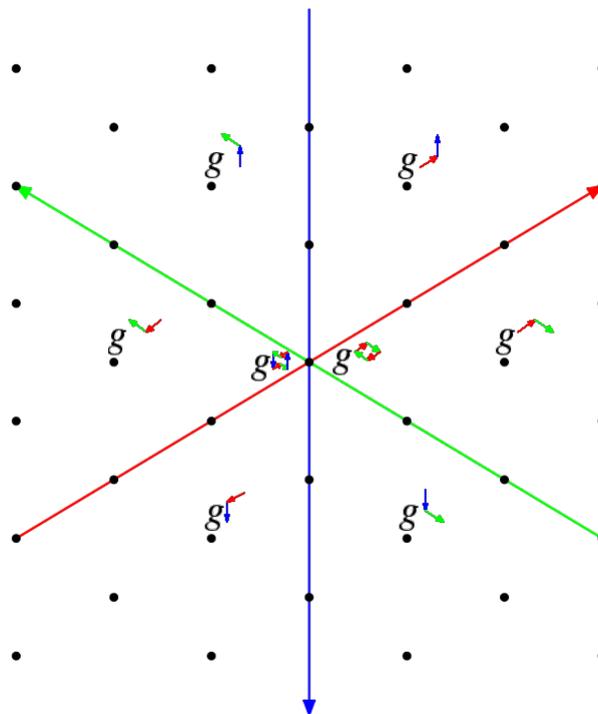
In der Übersicht sind alle bekannten Materieteilchen angegeben. An den blauen Kästen ist erkennbar, welche Ladungen sie besitzen und damit, welchen Wechselwirkungen sie unterliegen. An allen drei Wechselwirkungen nehmen daher ausschließlich die Quarks teil. Zu den Quarks gehören das Up-Quark  $u$ , das Down-Quark  $d$ , das Charm-Quark  $c$ , das Strange-Quark  $s$ , das Top-Quark  $t$  und das Bottom-Quark  $b$ . An der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung nehmen die drei elektrisch geladenen Leptonen das Elektron  $e^-$ , das Myon  $\mu^-$  und das Tauon  $\tau^-$  teil. Die elektrisch neutralen Leptonen unterliegen lediglich der schwachen Wechselwirkung. Es gibt in jeder Generation ein Neutrino: das Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , das Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  und das Tauon-Neutrino  $\nu_\tau$ .

In den Übersichten zu den Ladungen im Kapitel 2.1.1 sind allerdings noch weitere Teilchen abgebildet, deren Symbole denen der Materieteilchen ähneln, beispielsweise das Positron  $e^+$ . Dabei handelt es sich um die Anti-Materieteilchen. Zu jedem Materieteilchen gibt es ein Teilchen, welches die gleiche Masse besitzt, aber dessen Ladungen alle das umgekehrte Vorzeichen besitzen. Im Falle der starken Ladung ergibt sich dann der entsprechende Anti-Farbladungsvektor. Die Anti-Materieteilchen lassen sich deshalb analog ordnen.

Eine weitere Gruppe von Elementarteilchen bilden die Botenteilchen. Die fundamentalen Wechselwirkungen werden im Standardmodell über den Austausch von eben diesen Botenteilchen beschrieben. Aus diesem Grund gibt es drei Arten von Botenteilchen, für jede der drei im Standardmodell beschriebenen fundamentalen Wechselwirkungen eine. Das am längsten bekannte Botenteilchen ist das Photon  $\gamma$ . Es vermittelt die elektromagnetische Wechselwirkung. Treten nun zwei elektrisch geladene Teilchen in Wechselwirkung, so erzeugt das eine Teilchen ein Photon, welches von dem anderen absorbiert wird. Das Photon ist masselos und besitzt keine Ladungen.

Zur schwachen Wechselwirkung gehören drei Botenteilchen: das  $W^-$ , das  $W^+$ - und das  $Z$ -Teilchen. Da es sich auch bei diesen Teilchen um Elementarteilchen handelt, können sie ebenfalls anhand ihrer Masse und ihrer Ladungen charakterisiert werden. Diese drei Botenteilchen besitzen die Massen  $m_Z = 91 \frac{\text{GeV}}{c^2}$  und  $m_{W^\pm} = 80 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ , woraus sich ihre kurze Reichweite und damit die kurze Reichweite der schwachen Wechselwirkung ergibt. Das  $Z$ -Teilchen besitzt keine der drei Ladungen, wohingegen das  $W^-$ - und das  $W^+$ -Teilchen sowohl elektrische als auch schwache Ladungen besitzen:  $q_{W^-} = -1$ ,  $q_{W^+} = +1$ ,  $I_{W^-} = -1$  und  $I_{W^+} = +1$ . Die beiden  $W$ -Teilchen bilden damit ein Teilchen-Anti-Teilchen-Paar. Das  $Z$ -Teilchen ist sein eigenes Anti-Teilchen.

Die starke Wechselwirkung wird durch die sogenannten Gluonen  $g$  vermittelt. Es gibt insgesamt acht Gluonen. Sie besitzen nur starke Ladung und sind masselos. Die Farbladungsvektoren der Gluonen setzen sich aus den drei Farbladungsvektoren rot, grün und blau durch vektorielle Addition zusammen. In der folgenden Abbildung wird dies veranschaulicht. Zwei der Gluonen sind farbladungsneutral, weil sich bei ihnen die Farbladungsvektoren zum Nullvektor addieren.



**Abbildung 2.6:** Gitterpunkte der Gluonen im Farbgitter: Die starke Ladung eines Gluon setzt sich durch vektorielle Addition mehrerer Farbladungsvektoren zusammen. Quelle: Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 71.

Die kurze Reichweite der starken Wechselwirkung ergibt sich nicht wie bei der schwachen Wechselwirkung aus der Masse der Botenteilchen, sondern aus ihrer starken Ladung. Die Gluonen treten aufgrund dieser miteinander in Wechselwirkung, sie ziehen sich an. Die Auswirkung ist, dass die Kraft zwischen den beiden wechselwirkenden Quarks ab einem Abstand von ca. 0,2 fm konstant ist (vgl. Netzwerk Teilchenwelt 2015, S. 70f.). Sie hängt nicht mehr vom Abstand der beiden Quarks zueinander ab. Ab einem Abstand von ca. 1 – 2 fm ist die aufgewendete Arbeit groß genug für die Erzeugung eines neuen Quark-Anti-Quark-Paares (vgl. ebd., S. 70f.). Je eins der neu entstandenen Quarks bildet mit einem der ursprünglichen Quarks ein zusammengesetztes, farbladungsneutrales Teilchen. Es können also keine einzelnen Quarks oder Anti-Quarks beobachtet werden. Dieses Phänomen wird mit dem Begriff „Confinement“ bezeichnet.

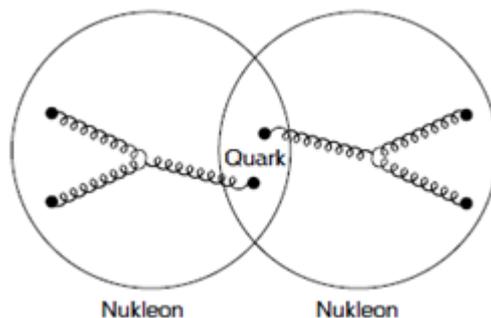
### 2.1.3 Zusammengesetzte Teilchen - Hadronen

Teilchen, welche aus Quarks zusammengesetzt sind, werden Hadronen genannt. Man unterscheidet dabei zwischen Mesonen und Baryonen. Ein Meson besteht aus einem Quark-Anti-Quark-Paar. Ein Beispiel für Mesonen sind die Pionen. Das elektrisch positiv geladene Pion  $\pi^+$ , welches auch einfach positives Pion genannt wird, besteht aus einem Up-Quark und einem Anti-Down-Quark. Das negative Pion  $\pi^-$ , welches negativ elektrisch geladen ist, besteht aus einem Down- und einem Anti-Up-Quark. Die beiden elektrisch geladenen Pionen sind damit Teilchen und Anti-Teilchen. Neben diesen beiden Pionen gibt es außerdem ein elektrisch neu-

trales Pion  $\pi^0$ . Dieses Pion ist eine Mischung der Systeme Up- mit Anti-Up-Quark und Down- mit Anti-Down-Quark<sup>6</sup>.

Baryonen bestehen aus drei Quarks. Die wohl bekanntesten Baryonen sind das Proton und das Neutron. Das Proton besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark während das Neutron aus einem Up-Quark und zwei Down-Quarks zusammengesetzt ist. Die Anti-Teilchen der Baryonen bestehen aus den drei entsprechenden Anti-Quarks. Das Anti-Proton ist daher aus zwei Anti-Up-Quarks und einem Anti-Down-Quark aufgebaut.

Der Grund dafür, dass Quarks gebundene Zustände bilden, d.h. sich zu Hadronen verbinden, ist die starke Wechselwirkung. Quarks besitzen eine starke Ladung und können sich aufgrund dieser anziehen. Die starke Ladung bewirkt sowohl die Anziehung der Quarks innerhalb eines Hadrons, als auch die Anziehung von Quarks verschiedener Hadronen. Aus diesem Grund können Protonen und Neutronen einen stabilen Atomkern bilden. Die Anziehung aufgrund der starken Wechselwirkung ist auf kurzen Distanzen stärker als die Abstoßung aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung, welche sowohl zwischen elektrisch gleich geladenen Quarks als auch zwischen Protonen herrscht. Die Bindung zwischen zwei Nukleonen (also Protonen bzw. Neutronen) kann man sich analog zur Elektronenpaarbindung vorstellen. Die Nukleonen sind wie alle Hadronen farbladungsneutral, aber sie können kurzzeitig gemeinsame Quarks besitzen, welche sich aufgrund der starken Wechselwirkung anziehen.



**Abbildung 2.7:** Zwei Nukleonen mit Quarkpaarbindung: Die Anziehung von zwei Nukleonen lässt sich mit dem Bild der Quarkpaarbindung vorstellen. Die Quarks der beiden Nukleonen ziehen sich aufgrund der starken Wechselwirkung an. Quelle: Povh u. a. 2004, S. 248 (Beschriftung „Diquark“ entfernt).

Neben den Hadronen aus Up- und Down-Quarks gibt es auch Hadronen, welche sich aus den anderen Quarks zusammensetzen. Baryonen und Mesonen, welche Strange-Quarks enthalten, wird dabei eine weitere Eigenschaft zugeschrieben, die sogenannte „Strangeness“. Jedes Strange-Quark trägt dabei mit  $-1$  zur Strangeness bei und jedes Anti-Strange-Quark mit  $+1$ . Beispielsweise besitzt das positive Kaon  $K^+$ , welches sich aus einem Up- und einem Anti-Strange-Quark zusammensetzt die Strangeness  $S = +1$ . Bei der Auswertung von Blasenkameraufnahmen können auch Spuren von Teilchen beobachtet werden, welche eine Strangeness

<sup>6</sup>Es handelt sich dabei um die quantenmechanische Überlagerung der beiden Zustände.

$S \neq 0$  besitzen.

## 2.1.4 Erhaltungssätze bei Wechselwirkungen

Bei jeder Wechselwirkung von Teilchen gelten bestimmte Erhaltungssätze. So ist z.B. die Energie bei jeder Teilchenwechselwirkung erhalten, d.h. die Summe der Energien der Teilchen vor und nach dem Prozess sind gleich. Im Falle der Blaskammeraufnahmen, bei welchen die Strahlteilchen einen großen Eingangsimpuls besitzen, muss darauf geachtet werden, dass eine relativistische Betrachtung der Energie erfolgt. Die Energie eines Teilchens berechnet sich im relativistischen Fall über die Energie-Impuls-Beziehung

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2},$$

wobei  $m$  die Masse und  $p$  den Impuls des Teilchens bezeichnet. Die Konstante  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit. Für jedes Teilchen, welches an der Wechselwirkung beteiligt ist, kann so die Gesamtenergie ausgerechnet werden.

Neben dem Energieerhaltungssatz gilt auch der Impulserhaltungssatz bei allen Wechselwirkungen. Die Summe der Impulse der Teilchen vor und nach der Wechselwirkung sind gleich. Der Impulserhaltungssatz gilt in der vektoriellen Form, d.h. die Bildung der Summe von Impulsen muss vektoriell erfolgen. Bezeichnen  $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_n$  die Impulse der Teilchen vor der Wechselwirkung und  $\vec{p}'_1, \vec{p}'_2, \dots, \vec{p}'_m$  die Impulse der Teilchen nach der Wechselwirkung, so gilt

$$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^m \vec{p}'_i$$

Ein weiterer wichtiger Erhaltungssatz betrifft die Ladungen der Teilchen. Bei jeder Wechselwirkung sind alle drei Ladungsarten, elektrische, schwache und starke Ladung, erhalten. Die Summen der elektrischen Ladungszahlen der beteiligten Teilchen müssen also vor und nach der Wechselwirkung übereinstimmen. Analog gilt dies für die Summe der schwachen Ladungszahlen. Im Falle der starken Ladung ist die Summe der Farbladungsvektoren erhalten. Für die Auswertung der Blaskammeraufnahmen spielen insbesondere die Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladung eine Rolle, da anhand dieser Erhaltungssätze Umwandlungshypothesen geprüft werden können (vgl. Kapitel 2.3.4). Die Erhaltung der starken Ladung spielt bei der Auswertung der Blaskammeraufnahmen keine Rolle, da alle beobachteten Teilchen farbladungsneutral sind.

Die Strangeness bildet eine Besonderheit unter den Erhaltungsgrößen. Sie ist unter der starken und elektromagnetischen Wechselwirkung erhalten, kann aber durch die schwache Wechselwirkung geändert werden. Teilchen, welche eine Strangeness besitzen, werden daher über die starke oder die elektromagnetische Wechselwirkung immer paarweise erzeugt. Die Erzeugung eines einzelnen Teilchens mit Strangeness durch die Wechselwirkung von zwei Teilchen ohne Stran-

geness ist theoretisch denkbar, aber so unwahrscheinlich gegenüber den Erzeugungsprozessen über die starke Wechselwirkung, dass sie praktisch nie beobachtet wird (vgl. Bleck-Neuhaus 2010, S. 515). Bei der Auswertung der Blasenkammeraufnahmen muss daher bei Wechselwirkungen, an denen in der Ausgangssituation keine Teilchen mit Strangeness beteiligt sind, die Erhaltung der Strangeness beachtet werden. Der Zerfall eines Teilchens mit Strangeness geschieht über die schwache Wechselwirkung, d.h. bei diesem Prozess ändert sich die Strangeness.

### 2.1.5 Einheiten in der Teilchenphysik

Als Einheit für die Energie wird in der Teilchenphysik Elektronenvolt (eV) verwendet. Es werden die üblichen Vorsätze, wie beispielsweise Mega und Kilo, genutzt, um Vielfache dieser Einheit zu bilden. Umgerechnet in die SI-Einheit Joule ergibt sich

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Die Masse von Teilchen wird angegeben in der Einheit  $\frac{\text{eV}}{c^2}$  bzw. Vielfachen davon. Diese Einheit ergibt sich aus der Äquivalenz von Masse  $m$  und Ruheenergie  $E_0$

$$E_0 = mc^2.$$

Die Geschwindigkeiten werden in Einheiten von, d.h. als Vielfache von, der Lichtgeschwindigkeit  $c$  gemessen. Für den Impuls ergibt sich dann die Einheit  $\frac{\text{eV}}{c}$ , denn

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}.$$

Werden Masse und Impuls in den vorgestellten Einheiten verwendet, so erleichtert sich beispielsweise der Umgang mit der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2},$$

denn die Konstante  $c$  kürzt sich an allen Stellen heraus und es muss somit nie ihr Wert eingesetzt werden.

In der Teilchenphysik werden häufig die Lichtgeschwindigkeit  $c$  und das plancksche Wirkungsquantum  $\hbar$  gleich 1 gesetzt. Dadurch erhalten dann Energie, Masse und Impuls die gleiche Einheit. In den folgenden Abschnitten und in den Materialien wird die Konstante  $c$  stets mitgeführt, um die Unterscheidung der Größen Masse, Impuls und Energie vor allem für die Lernenden zu erleichtern und die Einhaltung der Dimensionen nachvollziehbar zu gestalten.

## 2.2 Die Blaskammer

Kern der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien ist die Auswertung von Blaskammeraufnahmen. Aus diesem Grund werden einige Zusammenhänge über die Funktionsweise dieser hier dargelegt. Eine Besonderheit der Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau besteht in der dreidimensionalen Betrachtung der Ereignisse. Die Grundlagen für das Verständnis der räumliche Rekonstruktion werden daher ebenfalls erläutert. Zunächst erfolgt jedoch ein kurzer historischer Abriss.

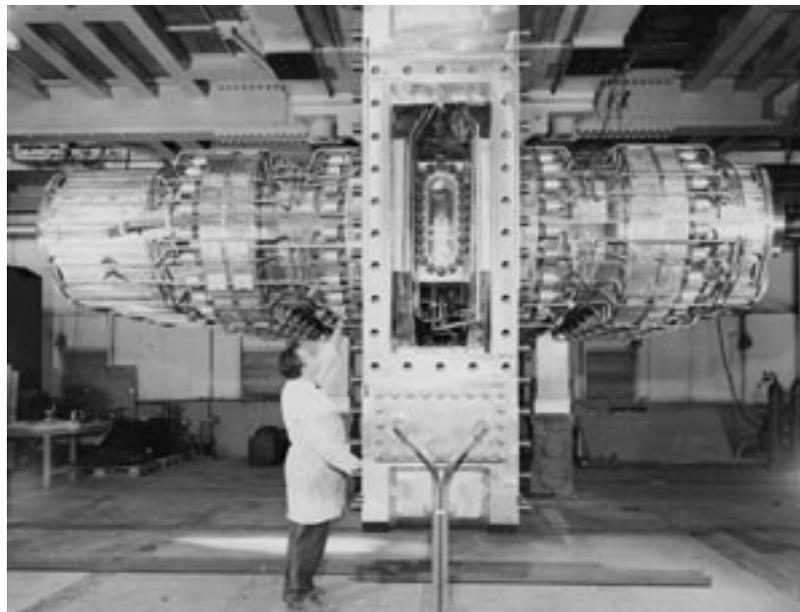
### 2.2.1 Geschichtliche Hintergründe

Die Blaskammer wurde von Donald A. Glaser erfunden, welcher dafür im Jahre 1960 den Nobelpreis für Physik erhielt. Anders als oft erzählt, erfand er die Blaskammer im Jahre 1952 nicht nur dadurch, dass er die Blasen in einem Glas Bier aufsteigen sah, sondern die Erfindung war das Ergebnis wohldurchdachter Untersuchungen (vgl. Rubbia 1994, S. XVII). Tatsächlich experimentierte Donald A. Glaser während seiner Untersuchungen zum Einfluss ionisierender Strahlung auf die Blasenbildung auch mit Bier (vgl. Glaser 1994, S. 5). Seine Hoffnung bestand darin einen Detektor entwickeln zu können, welcher sich durch eine höhere Genauigkeit als eine Nebelkammer auszeichnete und welcher sich dazu eignete, eine Vielzahl von Daten schnell zu sammeln (vgl. ebd., S. 3). Die Nebelkammer, welche gewissermaßen den Vorläufer der Blaskammer darstellt, wurde zu dieser Zeit eingesetzt, um Teilchenspuren sichtbar zu machen. Die Dichte des dabei eingesetzten Gases war allerdings zu gering, um bei Experimenten mit höheren Energien eingesetzt werden zu können. Bei den in der Blaskammer verwendeten Flüssigkeiten, welche eine um 2-3 Größenordnungen höhere Dichte besitzen, ergeben sich höhere Reaktionsraten bei den hochenergetischen Prozessen und es kommt zur Ausbildung stärkerer Ionisationsspuren (vgl. Bleck-Neuhaus 2010, S. 528). Der Energieverlust pro Weglänge ist also größer, sodass auch Teilchen mit großem Impuls so abgebremst werden, dass ihre Spuren eine auswertbare Krümmung besitzen, oder gar gänzlich gestoppt werden. Insbesondere die Nutzung von flüssigem Wasserstoff als Kammerflüssigkeit wurde von Luis Alvarez vorangetrieben, welcher 1968 den Nobelpreis unter anderem auch für die Weiterentwicklung der Blaskammer erhielt (vgl. Physikalische Blätter 1969). In den folgenden Jahren war die Weiterentwicklung der Blaskammern vor allem dadurch geprägt, dass immer größere Blaskammern gebaut wurden.

Die Blaskammer ermöglichte eine Vielzahl von Entdeckungen in der Teilchenphysik. So trug sie entscheidend zum Verständnis der Strangeness und der „seltsamen Teilchen“, welche eben jene Eigenschaft besitzen, der Bestätigung des Quarkmodells und dem Aufbau der Hadronen aus diesen, sowie der Vereinheitlichung der schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung bei (vgl. Mulvey 1994, S. 427ff.). Neben diesen physikalischen Errungenschaften hatte die Entwicklung der Blaskammer auch Auswirkungen auf das Bild der Wissenschaft. So

trug sie zur Popularisierung der Naturwissenschaften und insbesondere der Teilchenphysik in der Öffentlichkeit bei. Die Bilder visualisieren die Teilchenspuren und es lassen sich oft leicht Teilchen den Spuren zuordnen. Die Blasenkammer wird aus diesem Grund auch als „Auge der Wissenschaftler“ bezeichnet. Außerdem förderten die Blasenkammer auch die internationale Zusammenarbeit, denn die Aufnahmen wurden zwar beispielsweise am CERN aufgenommen, aber zur Auswertung an viele verschiedene Institute gesendet. Im Anschluss wurden die Daten dann wiederum zusammengefasst.

Die Blasenkammeraufnahmen, welche für die Erstellung der Materialien verwendet wurden, stammen von der 2 m großen Blasenkammer des CERN. Sie wurde 1964 fertiggestellt und war zwischen 1965 und 1977 in Betrieb (vgl. Peyrou 1994, S. 64). Diese Blasenkammer wurde an das Deutsche Museum in München gespendet (vgl. Rubbia 1994, S. XX).



**Abbildung 2.8:** Die 2 m große Blasenkammer am CERN.  
Quelle: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29120>

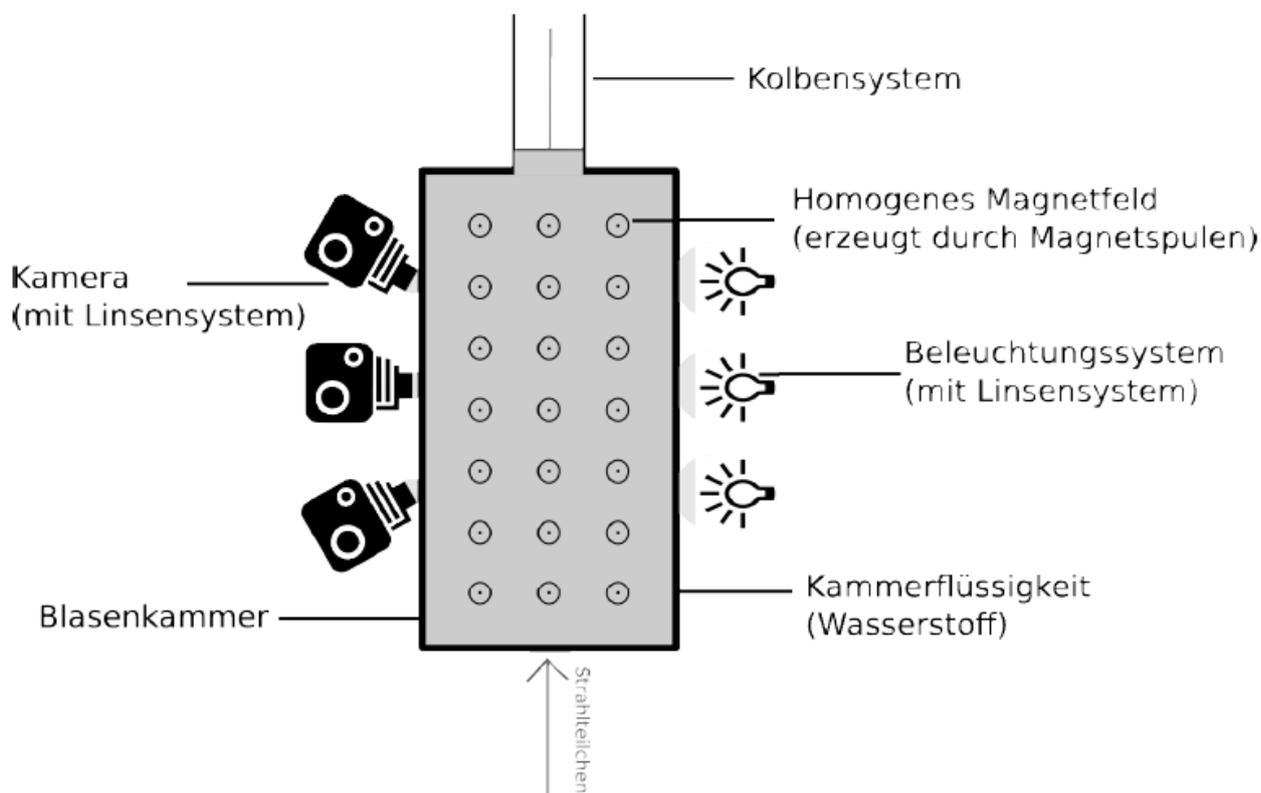
### 2.2.2 Aufbau und Funktionsweise der Blasenkammer

Die Blasenkammer gehört zu den visuellen Detektoren. Sie besteht aus einem Druckbehälter, welcher mit einer durchsichtigen Flüssigkeit, der Kammerflüssigkeit, gefüllt ist. Diese Flüssigkeit stellt gleichzeitig das Target<sup>7</sup>, für die Untersuchungen dar. Ein Teilchenstrahl bestehend aus ionisierender Strahlung wird in die Kammer eingeleitet. Die Teilchen durchlaufen zuvor einen Beschleuniger, sodass sie einen bestimmten Eingangsimpuls besitzen. Im Falle der Blasenkammeraufnahmen, welche im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, besteht der Teilchenstrahl aus Protonen mit einem Eingangsimpuls von 24 GeV. Die Kammerflüssigkeit

<sup>7</sup>Als Target bezeichnet man die Streuzentren, mit denen die einfallenden Teilchen wechselwirken.

der 2 m große Blasenkammer des CERN ist Wasserstoff. In anderen Blasenkammern wurden alternativ Propan, Deuterium, Neon, Xenon oder auch Helium eingesetzt (vgl. Kleinknecht 2005, S. 84f.).

Um die Ereignisse in der Blasenkammer beobachtbar zu machen, fotografieren Kameras das Kammerinnere. Sie befinden sich auf einer Seite der Blasenkammer während auf der anderen Seite Blitzlampen für die Beleuchtung sorgen. Insgesamt werden bei der 2 m großen Blasen-kammer drei Kameras verwendet. Durch die Aufnahme aus mehreren Perspektiven wird die räumliche Rekonstruktion der Ereignisse ermöglicht (vgl. Abschnitt 2.2.3).



**Abbildung 2.9:** Aufbau der Blasenkammer: In der Abbildung ist der schematische Aufbau der Blasenkammer gezeigt. Quelle: Schmidt 2015, S. 17.

Die gesamte Blasenkammer wird von einem homogenen Magnetfeld durchdrungen. Dies ermöglicht die Bestimmung der elektrischen Ladung eines Teilchens, welches eine Spur hinterlassen hat (vgl. Kapitel 2.3.1). Im Falle der 2 m großen Blasenkammer beträgt die Stärke des Magnetfeldes 1,74 T (vgl. Helzel 2002, S. 59). Das Magnetfeld wird durch supraleitende Helmholtzspulen erzeugt. Es werden supraleitende Spulen verwendet, weil diese keine Energie in Form von Wärme abgeben und so die Blasenkammer nicht aufheizen. Die Betriebstemperatur einer Blasenkammer ist sehr gering, da die als Kammerflüssigkeit verwendeten Elemente meist tiefe Siedetemperaturen besitzen. Im Falle einer Wasserstoff-Blasen-kammer beträgt die Betriebstemperatur beispielsweise 26 K bei einem Druck in der Kammer von 4 bar (vgl. Klein-

knecht 2005, S. 85). Aus diesem Grund muss die Kammer gut isoliert werden. Dazu wird sie von einem Vakuum umgeben.

Die Kammerflüssigkeit wird in dem Druckbehälter auf eine Temperatur nahe ihrer Siedetemperatur erhitzt. Mithilfe eines Kolbens erfolgt kurz vor dem Durchgang des Teilchenstrahls eine schnelle Vergrößerung des Kammervolumens. Durch diese Expansion wird der Druck in der Kammer verringert und die Siedetemperatur der Kammerflüssigkeit damit gesenkt. Die Temperatur der Kammerflüssigkeit liegt nun oberhalb der Siedetemperatur. Die eintretenden Strahlteilchen ionisieren entlang ihrer Bewegungsbahn die Atome der Kammerflüssigkeit. Die Ionen dienen als Keime für die Blasenbildung in der überhitzten Flüssigkeit. Das Kammerinnere wird fotografiert und im Anschluss wird der Druck in der Kammer wieder erhöht, wodurch sich die Blasen auflösen. Dann ist die Kammer wieder im Ausgangszustand und der Prozess kann von Neuem beginnen. Der Zyklus der Blasenkammer wird mit dem Puls des Beschleunigers synchronisiert.

Heute werden Blasenkammern nicht mehr als Detektor an Teilchenbeschleunigern genutzt. Sie wurden durch elektronische Detektoren abgelöst. Dies liegt unter anderem daran, dass die Experimente heute wiederum bei höheren Energien durchgeführt werden, für welche selbst die größten Blasenkammern nicht mehr ausreichen, um die Teilchen vollständig abzubremesen. Dabei wäre auch ein viel größeres Magnetfeld nötig, um die Teilchen auf eine gekrümmte Bahn zu lenken.

### 2.2.3 Geometrische Rekonstruktionen mit den Aufnahmen

Um eine räumliche Rekonstruktion der Teilchenspuren zu ermöglichen, werden Aufnahmen über mehrere Kameras an verschiedenen Positionen gemacht. Sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite der Blasenkammer befinden sich Markierungskreuze als Referenzpunkte:



**Abbildung 2.10:** Bezugsmarken der 2 m großen Blasenkammer: Die Markierungskreuze sind in die Innenseite der den Kameras zugewandten Glasplatte der Blasenkammer (links), in die Außenseite dieser (mitte) und in die Innenseite der gegenüberliegenden Glasplatte der Blasenkammer (rechts) eingekerbt. Quelle: Helzel 2002, S. 79.

Bei der 2 m großen Blasenkammer kommen drei Kameras zum Einsatz. Eine dieser Kameras ist zentral über der Blasenkammer positioniert. Die von dieser Kamera stammenden Aufnahmen werden mit View 2 bezeichnet. Die anderen beiden Kameras nehmen entsprechend View 1 und View 3 auf. Für die räumliche Rekonstruktion der Spuren werden lediglich zwei der drei Aufnahmen benötigt. Die dritte Aufnahme kann genutzt werden, falls eine Spur auf einer der

anderen Aufnahmen nicht gut erkennbar ist.

Aufgrund der verschiedenen Aufnahmepositionen erscheinen die Abbilder der Markierungskreuze und auch der Teilchenspuren bezüglich der drei Views gegeneinander verschoben. Diese Verschiebung kann ausgenutzt werden, um die  $z$ -Koordinaten der Teilchenspuren zu rekonstruieren.

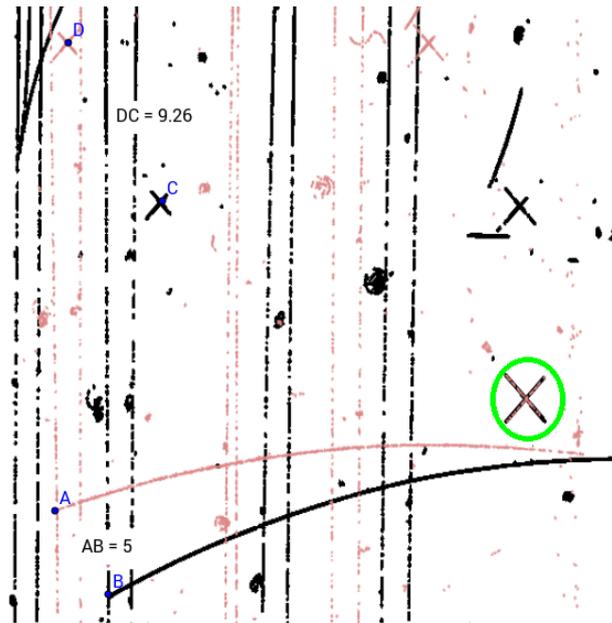
**Anmerkung:**

Das räumliche Sehvermögen des Menschen beruht auf dem gleichen Prinzip: Statt der beiden Kameras sind es dabei die beiden Augen, welche sich in einem bestimmten Abstand voneinander befinden und das gleiche Objekt abbilden. Die Bilder des Objektes auf der Netzhaut weisen ebenfalls eine Verschiebung gegeneinander auf. Das Gehirn kann daraus Rückschlüsse auf die Entfernung zum Objekt ziehen.

Bei der Auswertung der Aufnahmen macht man sich zunutze, dass die Tiefe, d.h. die  $z$ -Koordinate, für die Markierungen auf der Rückseite der Kammer bekannt ist. Um die  $z$ -Koordinate eines anderen Punktes zu ermitteln, müssen die beiden gewählten Aufnahmen so gegeneinander verschoben werden, dass zwei gleiche Vorderseitenkreuze übereinander liegen. Die Vorderseitenkreuze besitzen die  $z$ -Koordinate  $z_V = 0$  cm. Alle Punkte, die sich ebenfalls in der Tiefe  $z = 0$  cm befinden, liegen nun ebenfalls übereinander. Für die anderen Punkte gilt: Je größer ihre  $z$ -Koordinate ist, desto größer ist der Abstand ihrer beiden Abbilder. Für die Markierungen auf der Rückseite der Kammer ist die  $z$ -Koordinate bekannt mit  $z_R = 50,5$  cm. Durch Messung der Abstände zwischen den beiden Abbildern eines Rückseitenkreuzes und des betrachteten Punktes kann die  $z$ -Koordinate dieses Punktes bestimmt werden mit (vgl. Seul 2009, S.20):

$$z_P = 50,5 \text{ cm} \cdot \frac{d_P}{d_R}.$$

Hierbei bezeichnet  $d_R$  die Verschiebung des Rückseitenkreuzes und  $d_P$  die Verschiebung des betrachteten Punktes auf den beiden Aufnahmen. Für die Anwendung dieser Methode, welche auch als Stereo-Shift-Methode bezeichnet wird, zur Bestimmung der  $z$ -Koordinate eines Punktes ist es notwendig, dass der Punkt eindeutig auf beiden Aufnahmen identifizierbar ist. Anfangs- und Endpunkte von Spuren erfüllen dieses Kriterium in der Regel, allerdings ist die Bestimmung der  $z$ -Koordinate von Punkten auf der Spur, sogenannten Spurpunkten, mit dieser Methode meist nicht möglich.



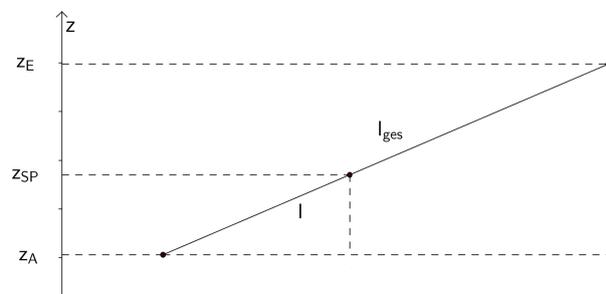
**Abbildung 2.11:** Stereo-Shift-Methode: Die Vorderseitenkreuze von View 2 (schwarze Blasenkammergebilde) und View 1 (farbige Blasenkammergebilde) werden übereinander gelegt (grüner Kreis). Die Verschiebung des Rückseitenkreuzes ( $C$  und  $D$ ) sowie des Anfangspunktes der Spur ( $A$  und  $B$ ) wird gemessen.

Um nun die  $z$ -Koordinate eines Spurpunktes zu bestimmen, sind folgende Überlegungen notwendig: Unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit eines Teilchens in  $z$ -Richtung konstant ist, kann die  $z$ -Koordinate eines Spurpunktes  $z_{SP}$  aus den  $z$ -Koordinaten  $z_A$  des Anfangs- und  $z_E$  des Endpunktes bestimmt werden. Zunächst muss dazu die Länge  $l_{ges}$  der Spur insgesamt und die Länge  $l$  des Teils der Spur bis zu dem betrachteten Spurpunkt ermittelt werden. Bei diesen beiden Längen handelt es sich um die Bogenlängen, nicht um die Längen der Sehnen. Es lässt sich dann mittels:

$$z_{SP} = z_A + \frac{l}{l_{ges}}(z_E - z_A) \quad (2.1)$$

die  $z$ -Koordinate des Spurpunktes  $SP$  bestimmen. Diese Beziehung lässt sich für eine ungekrümmte Spur wie folgt veranschaulichen. Nach dem Strahlensatz gilt:

$$\frac{z_{SP} - z_A}{z_E - z_A} = \frac{l}{l_{ges}}.$$



Nach einigen Umformungen ergibt sich Gleichung 2.1. Werden nun die Bogenlängen entsprechend eingesetzt, gilt die Formel auch für eine gekrümmte Spur.

In der Praxis ist die Geschwindigkeit des Teilchens in  $z$ -Richtung allerdings nicht konstant: Das

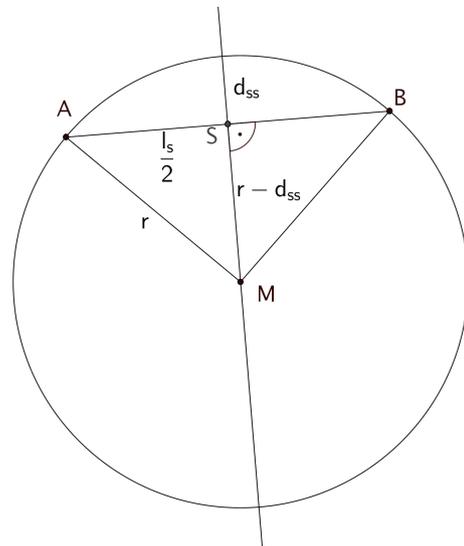
Teilchen verliert durch Ionisation und andere Wechselwirkungen mit anderen Teilchen ständig Energie und seine Geschwindigkeit verringert sich dadurch<sup>8</sup>. Das durch Gleichung 2.1 beschriebene Verfahren liefert also nur einen Näherungswert für die  $z$ -Koordinate des Spurpunktes. Da diese allerdings für weitere Berechnungen notwendig ist und nicht mit der Stereo-Shift-Methode bestimmt werden kann, wird das durch Gleichung 2.1 beschriebene Verfahren in den Materialien angewendet.

Der Impuls eines Teilchens kann aus dem Krümmungsradius der Spur, welche es hinterlassen hat, berechnet werden. Eine Möglichkeit diesen Radius zu bestimmen bietet die Sagitta-Methode. Um diese Methode anwenden zu können, müssen zwei Punkte  $A$  und  $B$  auf dem Kreisbogen bekannt sein. Auf ihrer Sehne, welche die Länge  $l_s$  besitzt, wird die Mittelsenkrechte konstruiert. Der Teil der Mittelsenkrechten, welcher zwischen dem Bogen und der Sehne liegt, besitzt die Länge  $d_{ss}$ . Mit diesen beiden Längen lässt sich nun der Radius berechnen, denn es gilt nach dem Satz des Pythagoras:

$$\begin{aligned} r^2 &= \left(\frac{l_s}{2}\right)^2 + (r - d_{ss})^2 \\ &= \left(\frac{l_s}{2}\right)^2 + r^2 - 2rd_{ss} + d_{ss}^2. \end{aligned}$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich:

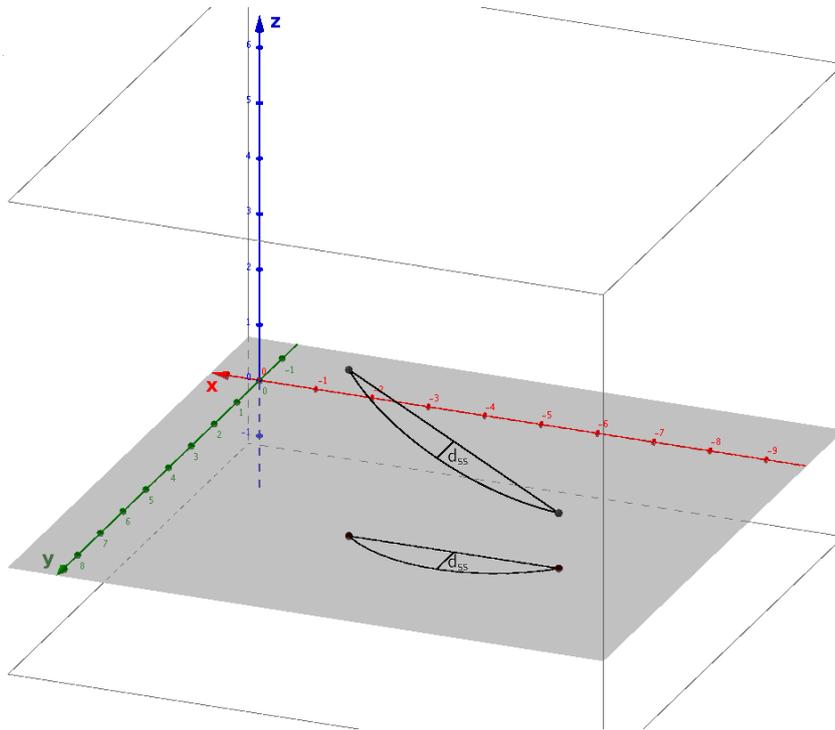
$$\begin{aligned} 2rd_{ss} &= \frac{l_s^2}{4} + d_{ss}^2 \\ \Leftrightarrow r &= \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}. \end{aligned}$$



Für einen Kreis, welcher sich im Raum befindet, gilt diese Gleichung ebenfalls, wenn die Maße  $l_s$  und  $d_{ss}$  in der entsprechenden Kreisebene gemessen werden. Im Falle der Länge  $l_s$  geschieht dies durch die Abstandsbestimmung der beiden Punkte auf dem Kreisbogen. Die Länge  $d_{ss}$  kann aus View 2 durch Messung des Abstandes zwischen Mittelpunkt der Sehne über dem projizierten Kreisbogen und dem projizierten Kreisbogen selbst entnommen werden (siehe Abbildung 2.12). Wiederum unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit in  $z$ -Richtung konstant ist, liegt die Strecke  $d_{ss}$  in einer Ebene senkrecht zur  $z$ -Achse und ihr Abbild in View 2 hat damit die gleiche Länge wie ihr Original<sup>9</sup>.

<sup>8</sup>Energieverluste durch Ionisation erleidet ein Teilchen in allen drei Raumrichtungen gleichmäßig. Die Bewegung des Teilchens in  $z$ -Richtung ist unbeeinflusst vom Magnetfeld in der Blaskammer, da das Magnetfeld in die  $z$ -Richtung zeigt.

<sup>9</sup>An dieser Stelle wird außerdem die Vereinfachung vorgenommen, dass die Vergrößerung von auf der Fotografie gemessenen Abständen zu Abständen in der Blaskammer für alle  $z$ -Ebenen innerhalb der Blaskammer gleich groß ist. Da es sich bei der Fotografie um eine Zentralprojektion handelt, ist dies streng genommen nicht der Fall.



**Abbildung 2.12:** Sagitta-Methode 3D: Die Länge  $d_{ss}$  kann direkt in der Projektion gemessen werden.

## 2.3 Auswertung von Blasenkammeraufnahmen

In den Materialien, welche im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden, werden verschiedene Auswerteverfahren für Blasenkammeraufnahmen vermittelt, um dadurch grundlegende Konzepte der Teilchenphysik zu verdeutlichen. Im folgenden Abschnitt stehen daher die für die Materialien relevanten Überlegungen zur Auswertung im Fokus. Die verwendeten Blasenkammeraufnahmen sind bei Experimenten mit einem Eingangsimpuls von  $24 \frac{\text{GeV}}{c}$  entstanden, d.h. die Protonen, die in die Blasenkammer injiziert wurden, besaßen diesen Impuls. Die Auswertung der Aufnahmen muss bei diesem Impuls die Gesetze der relativistischen Kinematik beachten. In den nachfolgenden Abschnitten bezeichnet dabei  $\gamma$  stets den Lorentzfaktor

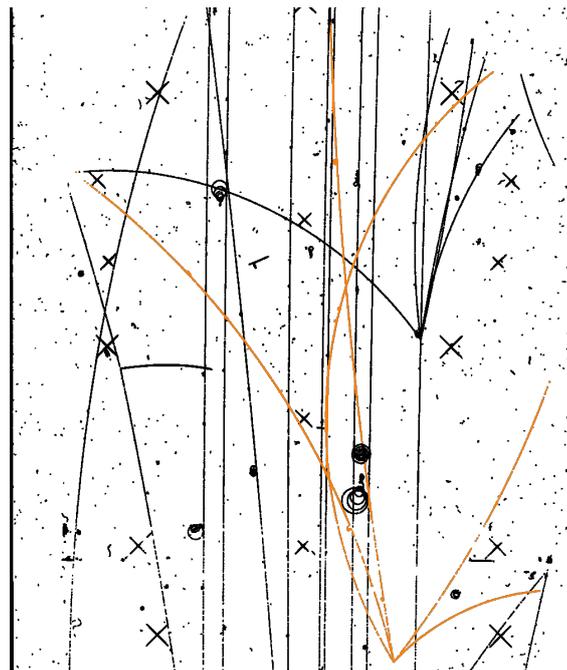
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

wobei  $v$  die Geschwindigkeit des Teilchens und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit angeben.

## 2.3.1 Teilchenidentifikation

Auf Blasenkammeraufnahmen sind die Spuren von bewegten, elektrisch geladenen Teilchen sichtbar. Diese Teilchen ionisieren die Atome der Kammerflüssigkeit, wodurch sich Blasen bilden können (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese Blasen sind dann auf den Aufnahmen sichtbar. Ruhende und elektrisch neutrale Teilchen hinterlassen keine Spuren auf den Bildern und können damit nicht direkt nachgewiesen werden.

Da die Blasenkammer von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt ist, kann anhand der Krümmungsrichtung einer Spur ein Rückschluss auf das Ladungsvorzeichen der elektrischen Ladung des Teilchens, welches diese Spur hinterlassen hat, erfolgen. Auf ein bewegtes, elektrisch geladenes Teilchen wirkt in einem Magnetfeld die Lorentzkraft senkrecht zur Bewegungs- und Magnetfeldrichtung (siehe Kapitel 2.3.2). Mithilfe der Rechten-Hand-Regel<sup>10</sup> kann aus der Richtung der Geschwindigkeit und des Magnetfeldes abgeleitet werden, in welche Richtung die Kraft auf ein positiv elektrisch geladenes Teilchen wirkt, d.h. in welche Richtung die Spur gekrümmt ist<sup>11</sup>. In der nachfolgenden Abbildung sind die Spuren positiv und negativ elektrisch geladener Teilchen gezeigt.



**Abbildung 2.13:** Krümmungsrichtung der Spuren: Bei dieser Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs (vgl. Kapitel 2.3.4) sind positiv und negativ elektrisch geladene Teilchen entstanden, deren Spuren farbig hervorgehoben sind. Die Teilchen haben sich vom Wechselwirkungspunkt weg bewegt und das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus. Somit ergibt sich, dass drei positiv und zwei negativ elektrisch geladene Teilchen entstanden sind.

<sup>10</sup>Die Linke-Hand-Regel ist ebenfalls nutzbar. Dann wird allerdings die Richtung der Kraft auf ein negativ elektrisch geladenes Teilchen bestimmt.

<sup>11</sup>Der Daumen zeigt in Richtung der Geschwindigkeit, der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes und der Mittelfinger zeigt dann die Richtung der Kraft an.

Um ein Teilchen konkret zu identifizieren, müssen neben der elektrischen Ladung auch die Prozesse und Wechselwirkungen betrachtet werden, an welchen es beteiligt war. Durch das Aufstellen von Umwandlungshypothesen, welche alle Erhaltungssätze beachten (siehe Kapitel 2.1.4), wird die Vielzahl an Möglichkeiten eingegrenzt. Letztendlich kann es durchaus möglich sein, dass mehrere Umwandlungshypothesen als zulässig anzusehen sind. Es kann also sein, dass keine eindeutige Identifikation eines Teilchens möglich ist.

Neutrale Teilchen hinterlassen keine Spuren. Dennoch kann indirekt darauf geschlossen werden, dass neutrale Teilchen an bestimmten Wechselwirkungen beteiligt sind. In dem Fall, in welchem es an einem Wechselwirkungspunkt (Vertex) keine einlaufende Spur gibt, kann auch auf die Existenz eines neutralen Teilchens geschlossen werden. Dieses hat sich dann entweder in elektrisch geladene Teilchen umgewandelt oder es ist mit einem ruhenden Teilchen in Wechselwirkung getreten. Bei jeder Wechselwirkung gilt außerdem der Impulserhaltungssatz. Anhand der Spuren können die Impulse der elektrisch geladenen Teilchen bestimmt werden (vgl. Kapitel 2.3.2). Unterscheidet sich der Gesamtimpuls vor einer Wechselwirkung vom Gesamtimpuls nach dieser Wechselwirkung, so müssen ebenfalls neutrale Teilchen beteiligt gewesen sein.

Anhand der Blasendichte lässt sich ein Rückschluss auf die Masse eines Teilchens ziehen. Die Anzahl der Blasen entlang der Teilchenbahn ist indirekt proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit, mit welcher sich das Teilchen bewegt (vgl. Seul 2009, S. 10). Da der Zusammenhang

$$p = \gamma \cdot m \cdot v$$

zwischen Impuls  $p$ , Masse  $m$  und Geschwindigkeit  $v$  eines Teilchens besteht, hinterlässt ein massereicherer Teilchen bei gleichem Impuls eine dichtere und damit dickere Spur als ein leichteres Teilchen.

### 2.3.2 Impulsberechnung

Der Impuls von Teilchen, welche Spuren auf den Blasenkammeraufnahmen hinterlassen haben, kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Aufgrund des homogenen Magnetfelds, welches die Blasenkammer durchsetzt, gibt die Krümmung einer Spur Auskunft über den Impuls des Teilchens. Auf ein bewegtes Teilchen, welches die elektrische Ladung  $Q$  besitzt und sich mit der Geschwindigkeit  $v$  in einem Magnetfeld der Stärke  $B$  bewegt, wirkt die Lorentzkraft  $\vec{F}_L$

$$\vec{F}_L = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}).$$

Die Kraft wirkt damit senkrecht zur Bewegungsrichtung und zur Richtung des Magnetfeldes. Die Lorentzkraft wirkt also als Radialkraft und zwingt das Teilchen auf eine Kreisbahn. Um ein Teilchen mit der Masse  $m$  und der Geschwindigkeit  $v$  auf eine Kreisbahn mit dem Radius  $r$

zu lenken wird eine Radialkraft mit dem Betrag

$$F_R = \gamma \cdot m \cdot \frac{v^2}{r}$$

benötigt. Da nun die Lorentzkraft als Radialkraft wirkt, können die Beträge beider Kräfte gleichgesetzt werden, wobei zu beachten ist, dass nur der Anteil der Geschwindigkeit  $v_{\perp}$ , welcher senkrecht zum Magnetfeld steht, beiträgt:

$$\begin{aligned} F_L &= F_R \\ Q \cdot v_{\perp} \cdot B &= \gamma \cdot m \cdot \frac{v_{\perp}^2}{r} \\ \Leftrightarrow \gamma \cdot m \cdot v_{\perp} &= Q \cdot B \cdot r. \end{aligned}$$

Die linke Seite der Gleichung entspricht dem Betrag des Impulses  $p$  des Teilchens<sup>12</sup> und somit gilt

$$p = Q \cdot B \cdot r.$$

Durch Messung des Radius  $r$  einer Spur kann bei Kenntnis der Stärke des Magnetfeldes  $B$  und der elektrischen Ladung des Teilchens  $Q$  damit der Impuls  $p$  des Teilchens bestimmt werden, welches die Spur hinterlassen hat.

Die elektrische Ladung  $Q$  des Teilchens berechnet sich durch Multiplikation seiner elektrischen Ladungszahl  $q$  mit der Elementarladung  $e$

$$Q = q \cdot e.$$

Für Teilchen, welche eine elektrische Ladungszahl von  $q = 1$  oder  $q = -1$  besitzen, vereinfacht sich die Berechnung des Betrags des Impulses damit zu<sup>13</sup>

$$p = e \cdot B \cdot r.$$

Bei Verwendung der in der Teilchenphysik üblichen natürlichen Einheiten (siehe Kapitel 2.1.4), kann die Gleichung zu

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

<sup>12</sup>Es handelt sich dabei genau genommen um den zum Magnetfeld senkrechten Anteil des Impulses  $p_{\perp}$ . In den Materialien wird der Krümmungsradius dreidimensional bestimmt (vgl. Kapitel 2.2.3). Dieser ist größer als seine Projektion in der  $x$ - $y$ -Ebene, welche senkrecht zum Magnetfeld liegt. Damit ergibt sich ein größerer Impuls, welcher als Gesamtimpuls angenommen wird. Dieses Vorgehen wird auch in der Software zur Auswertung von Blasenkameraufnahmen angewendet (vgl. Helzel 2002).

<sup>13</sup>Beim Betrag spielt das Vorzeichen keine Rolle.

umgeformt werden. Werden in diese Gleichung die Stärke des Magnetfeldes in der Einheit Tesla und der Radius in der Einheit Meter eingesetzt, so erhält man als Einheit für den Betrag des Impulses  $\frac{\text{GeV}}{c}$ , wie die folgende Betrachtung zeigt:

$$[p] = [e \cdot B \cdot r] = e \cdot \text{T} \cdot \text{m}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ e} \cdot \text{T} \cdot \text{m} &= 1 \frac{\text{e} \cdot \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} \\ &= \frac{1 \text{ eV}}{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \\ &= \frac{10^{-9} \text{ GeV}}{\frac{1}{3 \cdot 10^8} c} \\ &= 0,3 \frac{\text{GeV}}{c} \end{aligned}$$

Eine zweite Möglichkeit, den Impuls eines Teilchens anhand von Blasenkammeraufnahmen zu messen, basiert darauf, dass das Teilchen beim Durchqueren der Kammer durch Wechselwirkungen mit der Kammerflüssigkeit Energie verliert. Größtenteils geschehen diese Wechselwirkungen mit den Hüllenelektronen der Atome der Kammerflüssigkeit und es kommt zur Anregung oder Ionisation dieser Atome (vgl. Povh u. a. 2004, S. 364). Dieser Energieverlust pro Wegstrecke wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 \right] \rho,$$

wobei gilt (vgl. Particle Data Group 2012, S. 243ff. und Helzel 2002, S. 60f.):

$K = 0,307075 \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}}$	Zusammenfassung von Naturkonstanten
$z$	elektrische Ladungszahl des Teilchens
$Z$	Kernladungszahl der Kammerflüssigkeit
$A$	Atommasse der Kammerflüssigkeit
$I$	mittlere Anregungsenergie der Kammerflüssigkeit, $I_{H_2} = 21,8 \cdot 10^{-6} \text{ MeV}$
$\rho$	Dichte der Kammerflüssigkeit, $\rho_{H_2} = 0,063 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
$\beta = \frac{v}{c}$	
$v$	Geschwindigkeit des Teilchens
$m_e$	Masse des Elektrons
$c$	Lichtgeschwindigkeit
$\gamma$	Lorentzfaktor

$T_{max}$	maximale kinetische Energie, welche pro Wechselwirkung an ein freies Elektron abgegeben werden kann
	$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{M} + (\frac{m_e}{M})^2}$
$M$	Masse des Teilchens

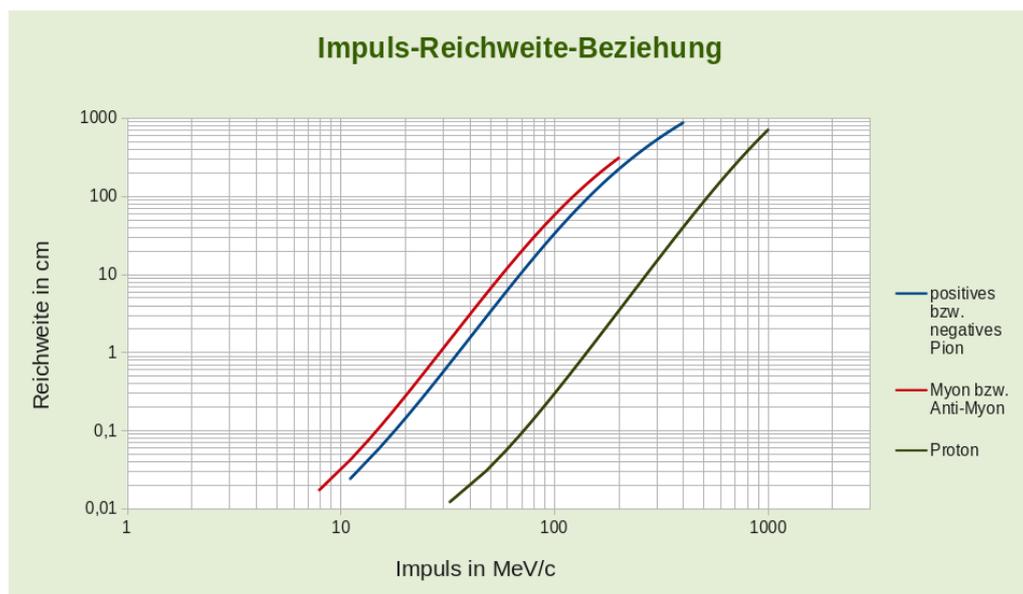
Die Bethe-Bloch-Formel kann genutzt werden, um eine Beziehung zwischen Impuls und Reichweite des Teilchens in der Blaskammer herzustellen. Ist der Anfangsimpuls eines Teilchens  $p_0$ , so gibt es pro Wegstrecke  $dx$  die Energie  $dE$  ab. Der Impuls ändert sich in Abhängigkeit von der kinetischen Energie. Durch iteratives Vorgehen kann so die Impuls-Reichweite-Beziehung bestimmt werden:

$$E_j = E_{j-1} - dE(p_{j-1}),$$

$$p_j = p(E_j).$$

Entsprechend der gewählten Schrittweite  $dx$ , kann dann die Reichweite, welche das Teilchen mit dem Anfangsimpuls  $p_0$  erreicht, errechnet werden.

Da die maximale kinetische Energie, die pro Weglänge an ein freies Elektron abgegeben werden kann, von der Masse des Teilchens abhängt und in die Bethe-Bloch-Formel eingeht, ist die Impuls-Reichweite-Beziehung ebenfalls abhängig von der Masse des Teilchens. Entsprechend ergeben sich für unterschiedliche Teilchen, individuelle Reichweiten zu den gleichen Impulsen. In der nachfolgenden Abbildung ist die Impuls-Reichweite-Beziehung für verschiedene Teilchen gezeigt.



**Abbildung 2.14:** Impuls-Reichweite-Beziehung: Das Diagramm zeigt die Impuls-Reichweite-Beziehung für das positive bzw. negative Pion, das Myon bzw. Anti-Myon und das Proton. Die Achseneinteilung ist für beide Achsen logarithmisch.

Bei der Auswertung der Blasenkammeraufnahmen wird die Länge der Spur gemessen, welche der Reichweite des Teilchens entspricht, welches diese Spur hinterlassen hat. Anschließend wird in Tabellen nachgeschlagen oder wie in den Materialien im Graph der Impuls-Reichweite-Beziehung abgelesen, welchen Anfangsimpuls das Teilchen besaß.

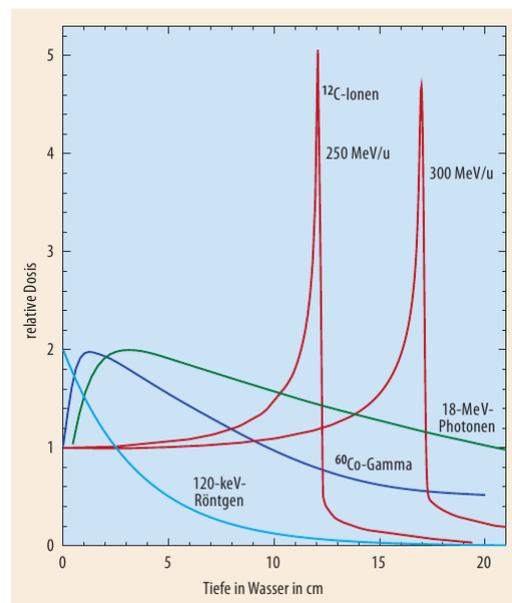
Nicht jedes der beiden Verfahren ist für jede der Spuren auf Blasenkammeraufnahmen geeignet. Für die Bestimmung des Impulses aus der Reichweite muss die gesamte Spur sichtbar sein, denn sonst kann die Länge nicht bestimmt werden. Besitzen die Teilchen einen großen Impuls sind häufig nur Ausschnitte der Spuren auf den Bildern sichtbar und diese Methode ist nicht anwendbar. Bei diesen Teilchen kann die Krümmungsmessung ebenfalls problematisch werden, wenn die Spuren nahezu geradlinig verlaufen und so keine Krümmung erkennbar ist. Eine Ungenauigkeit bei der Impulsbestimmung über die Krümmung der Spur entsteht dadurch, dass sich die Krümmung im Verlaufe der Spur ändert, da das Teilchen Impuls verliert. Bei spiralförmigen Spuren ist dieser Effekt besonders stark sichtbar, weshalb dann der größtmögliche Krümmungsradius gemessen werden sollte<sup>14</sup>. Bei spiralförmigen Spuren ist auch eine Messung über die Impuls-Reichweite-Beziehung nicht möglich, da sie sich nicht durch einen einfachen Bogen beschreiben lassen. Für besonders kurze Spuren ist die Impulsbestimmung aus der Reichweite klar der Bestimmung aus dem Krümmungsradius vorzuziehen. Bei diesen Spuren ist eine Krümmungsmessung mit großen Ungenauigkeiten verbunden.

---

<sup>14</sup>Die räumliche Rekonstruktion ist jedoch komplizierter, wenn der Endpunkt der Spur nicht einbezogen werden kann.

**Anmerkung:**

Die Abgabe der Energie eines elektrisch geladenen Teilchens an das Medium, welches es durchquert, ist abhängig vom Impuls des Teilchens. Am Ende der Teilchenbahn, also kurz bevor es zur Ruhe kommt, erreicht die Ionisationsintensität ein Maximum, den sogenannten Bragg-Peak (vgl. Kraft 2006, S. 30). Diese Eigenschaft wird bei der Therapie zur Behandlung von Krebs ausgenutzt. Elektrisch geladene Teilchen, beispielsweise Protonen oder Schwerionen, durchqueren das Körpergewebe und treten mit den Atomen in Wechselwirkung wie mit der Kammerflüssigkeit in der Blasenkanne. Je langsamer die Teilchen werden, desto mehr Energie geben sie durch Ionisation ab bis das Maximum erreicht ist. Ist nun der Tumor im Körper genau lokalisiert, kann der Eingangsimpuls der Strahlteilchen so eingestellt werden, dass dieses Maximum in der Eindringtiefe erreicht wird, wo sich der Tumor befindet. Dadurch werden gezielt Tumorzellen vernichtet und das umliegende Gewebe geschont.



**Abbildung 2.15:** Deponierte Energie-Dosis in Abhängigkeit von der Eindringtiefe: Bei Strahlen elektrisch geladener Teilchen liegt das Maximum der deponierten Dosis am Ende der Reichweite. Quelle: Kraft 2006, S. 30.

### 2.3.3 Proton-Proton-Streuung

Trifft ein Proton des einlaufenden Strahls auf ein Proton des Wasserstoffs, welcher bei der 2m großen Blasenkammer als Kammerflüssigkeit dient, so kommt es zur Wechselwirkung der beiden Teilchen<sup>15</sup>. Man spricht von Proton-Proton-Streuung (*pp*-Streuung). Am Vertex einer solchen *pp*-Streuung ist lediglich eine einlaufende Spur erkennbar, weil das Proton des Wasserstoffs ruht. In der Teilchenphysik wird zwischen elastischer und inelastischer Wechselwirkung unterschieden. Ein elastischer Prozess ist dadurch gekennzeichnet, dass die Teilchen vor und nach der Wechselwirkung identisch sind und sich lediglich ihr Impuls und ihre Energie ändern (vgl. Povh u. a. 2004, S. 44). Bei einer elastischen Streuung von zwei Protonen sind also nach der Wechselwirkung immer noch zwei Protonen vorhanden. Der Impuls und damit die Energie der einzelnen Teilchen haben sich verändert. Auf einer Blasenkammeraufnahme wird dies dadurch deutlich, dass zwei auslaufende Spuren vom Vertex weg führen, denn das ursprünglich ruhende Proton des Wasserstoffs bewegt sich nach der Wechselwirkung ebenfalls.

Bei einem inelastischen Prozess wird das Targetteilchen auf einen höheren Energiezustand angeregt und geht durch Abgabe eines Teilchens oder Umwandlung in andere Teilchen in den Grundzustand über (vgl. ebd., S. 45). Die Teilchen vor und nach der Wechselwirkung sind damit nicht identisch. Auf den Blasenkammeraufnahmen macht sich dies dadurch bemerkbar, dass es eine gerade Anzahl von auslaufenden Spuren am Vertex bei einer *pp*-Streuung gibt. Die gerade Anzahl ergibt sich aus der Erhaltung der Summe der elektrischen Ladungszahlen. Vor der Wechselwirkung beträgt diese Summe +2. Es müssen also nach der Wechselwirkung zwei positiv elektrisch geladene Teilchen mehr vorliegen als negativ elektrisch geladene Teilchen<sup>16</sup>. Die Erhaltung der schwachen Ladung und der Strangeness sind ebenfalls erfüllt.

Bei Vertizes mit zwei auslaufenden Spuren ist die Unterscheidung zwischen elastischer und inelastischer Streuung schwieriger. Es könnte sich um den Prozess

$$pp \rightarrow pp,$$

also eine elastische Wechselwirkung, oder um die Prozesse

$$pp \rightarrow pn\pi^+ \text{ bzw. } pp \rightarrow pp\pi^0,$$

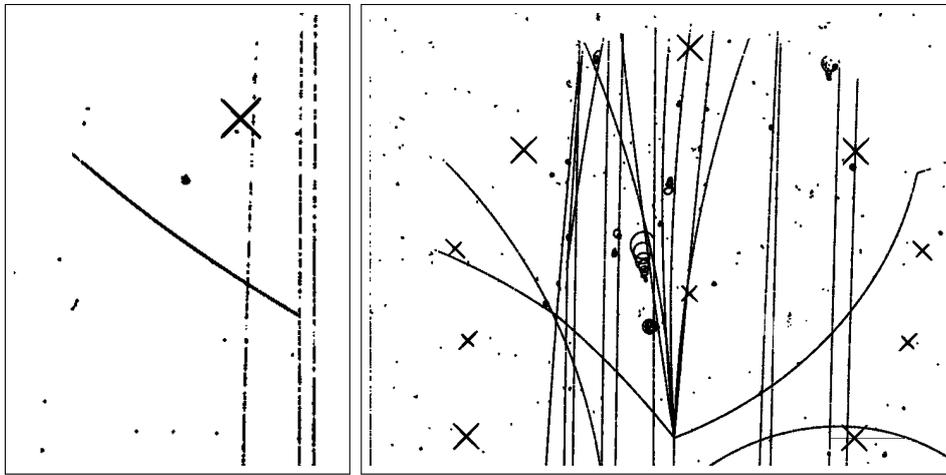
also inelastische Wechselwirkungen, handeln<sup>17</sup>. Das bei der inelastischen Wechselwirkung entstandene elektrisch neutrale Teilchen hinterlässt keine Spur auf dem Blasenkammerbild. Seine

<sup>15</sup>Die Ionisation, welche ohnehin entlang der Teilchenbahn geschieht und zur Blasenbildung führt, wird hier vernachlässigt.

<sup>16</sup>Entstehen  $n$  negativ elektrisch geladene Teilchen, so muss es  $n + 2$  positiv elektrisch geladene Teilchen geben. Das sind insgesamt  $2n + 2$  elektrisch geladene Teilchen, welche auslaufende Spuren hinterlassen. Dies gilt unter der Annahme, dass alle beteiligten Teilchen einfach elektrisch geladen sind. Teilchen mit mehrfacher elektrischer Ladung werden nicht beobachtet.

<sup>17</sup>Da die Strahlteilchen eine große Energie besitzen, ist auch die Entstehung mehrerer neutraler Teilchen möglich, beispielsweise  $pp \rightarrow pn\pi^+\pi^0$ .

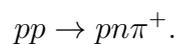
Existenz ist nur über die Betrachtung der Impulse der einlaufenden und der auslaufenden Teilchen nachweisbar. Entspricht die vektorielle Summe der Impulse der Teilchen, welche auslaufende Spuren hinterlassen haben, nicht der vektoriellen Summe der Impulse der einlaufenden Teilchen, so muss ein neutrales Teilchen den fehlenden Impuls besitzen. Bei der Wechselwirkung eines Strahlteilchens mit einem Proton des Wasserstoffs sind die Impulse vor der Wechselwirkung bekannt. Das Proton des Wasserstoffs ruht und besitzt damit  $\vec{p}_1 = \vec{0}$ <sup>18</sup>. Das Proton des Strahls besitzt einen Eingangsimpuls von  $p_2 = 24 \frac{\text{GeV}}{c}$  in  $y$ -Richtung<sup>19</sup>. Mithilfe des Energieerhaltungssatzes können verschiedene Hypothesen getestet werden, um so zu entscheiden, welcher Prozess stattgefunden hat.



**Abbildung 2.16:** Ausschnitte aus der Blasenkammeraufnahme 2663: Bei der linken Abbildung gibt es zwei auslaufende Spuren am Vertex. Es kann sich um eine elastische oder eine inelastische Streuung handeln. Ein Vergleich der Impulse ist notwendig, um diesen Vorgang genauer zu charakterisieren. In der rechten Abbildung gibt es acht Spuren, welche vom Vertex weg führen. Es handelt sich um eine inelastische Streuung.

### 2.3.4 Streuung von Neutronen an Protonen

Ein weiterer typischer Vorgang in der Blasenkammer ist die Streuung von Neutronen an den Protonen des Wasserstoffs in der Blasenkammer. Die Neutronen müssen dabei zuvor bei einer anderen Wechselwirkung entstanden sein. Beispielsweise könnte bei einer Proton-Proton-Streuung ein Neutron entstehen:



<sup>18</sup>Der Vektor  $\vec{0}$  bezeichnet den Nullvektor.

<sup>19</sup>Die Strahlteilchen durchqueren die Blasenkammer auf den Aufnahmen von unten nach oben. In den Materialien entspricht dies der  $y$ -Richtung. Aufgrund des Magnetfeldes besitzen sie ebenfalls einen Impuls in  $x$ -Richtung, welcher aber vernachlässigbar ist im Vergleich zu dem Eingangsimpuls in  $y$ -Richtung.

Die Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs erzeugt ein typisches Spurmuster, welches auch als Neutronenstern<sup>20</sup> bezeichnet wird. Dieses Spurmuster besitzt typische Eigenschaften, welche sich aus den Merkmalen der Wechselwirkung ableiten lassen.

- Es gibt keine einlaufenden Spuren zum Vertex:

Da das Neutron als elektrisch neutrales Teilchen in der Blasenkammer keine Spuren hinterlässt und das Proton, mit welchem es wechselwirkt, vor der Streuung ruht, führen keine Spuren zum Wechselwirkungspunkt hin.

- Die Anzahl der auslaufenden Spuren ist ungerade:

Die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Wechselwirkung beträgt

$$q_n + q_p = 0 + 1 = +1.$$

Da die elektrische Ladung bei der Wechselwirkung erhalten bleibt, muss nach der Wechselwirkung ein elektrisch positiv geladenes Teilchen mehr vorhanden sein als elektrisch negativ geladene Teilchen<sup>21</sup>.

Um die auslaufenden Teilchen identifizieren zu können, muss die Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladung beachtet werden. Wie oben bereits erläutert, beträgt die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung +1. Die Summe der schwachen Ladungszahlen vor der Umwandlung beträgt

$$I_n + I_p = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 0.$$

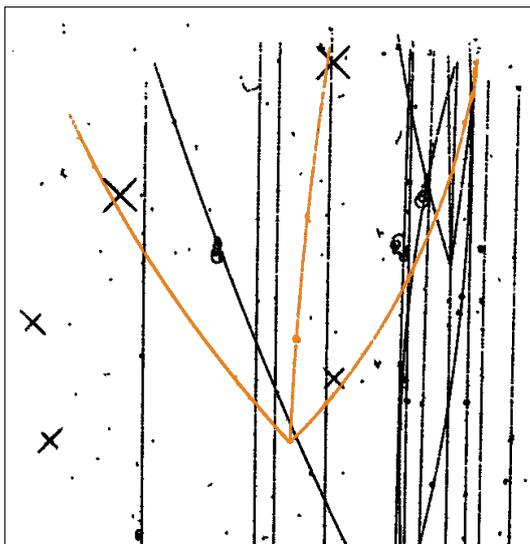
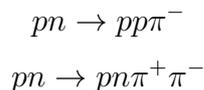
Bei der Umwandlung ist auch die Strangeness erhalten (siehe Abschnitt 2.1.4). Sie beträgt vor der Umwandlung 0, weil weder Proton noch Neutron aus Strange- bzw. Anti-Strange-Quarks bestehen. Mithilfe dieser Erhaltungssätze können Hypothesen darüber aufgestellt werden, welche Teilchen die auslaufenden Spuren hinterlassen haben.

<sup>20</sup>Dieser Begriff wird im Rahmen dieser Arbeit und auch in den Materialien als Bezeichnung für das Spurmuster verwendet, welches bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs auf einer Blasenkammeraufnahme zu sehen ist. Es besteht kein Zusammenhang zu den astronomischen Neutronensternen.

<sup>21</sup>Angenommen es entstehen  $n$  elektrisch negativ geladene Teilchen. Dann muss es  $n + 1$  elektrisch positiv geladene Teilchen geben, damit die Summe der elektrischen Ladungszahlen +1 ist. Insgesamt sind dann  $2n + 1$  Teilchenspuren sichtbar. Zusätzlich können elektrisch neutrale Teilchen entstanden sein.

**Hypothesenbildung:**

Es sind drei elektrisch geladene Teilchen entstanden, wobei zwei davon positiv und eins negativ elektrisch geladen sind. Die Summe ihrer schwachen Ladungszahlen muss 0 betragen und die Strangeness ebenfalls 0. Mögliche Hypothesen sind:



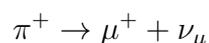
**Abbildung 2.17:** Ausschnitt aus der Blasenkammeraufnahme 2930: Der Neutronenstern ist farbig hervorgehoben. Es gibt keine einlaufenden Spuren zum Wechselwirkungspunkt. Die Anzahl der auslaufenden Spuren ist ungerade.

Es besteht die Möglichkeit, dass mehrere Hypothesen zulässig sind, sodass keine eindeutige Aussage darüber möglich ist, welche Teilchen bei der Wechselwirkung entstanden sind. Anhand weiterer Auswertungen der restlichen Blasenkammeraufnahme kann eventuell aufgrund von Folgeumwandlungen die Anzahl der Hypothesen eingegrenzt werden.

Eine Aussage darüber, ob bei der Wechselwirkung neutrale Teilchen entstanden sind, ist nicht möglich. Neutrale Teilchen hinterlassen keine Spuren in der Blasenkammer und können somit nicht direkt nachgewiesen werden. Eine Betrachtung der Impulserhaltung ist im Falle der Neutronensterne ebenfalls nicht möglich, da der Eingangsimpuls des Neutron nicht bekannt ist. Es kann also sein, dass neben den geladenen Teilchen, welche die auslaufenden Spuren hinterlassen haben, auch neutrale Teilchen entstanden sind. Auch für diese Fälle lassen sich Hypothesen aufstellen und prüfen (siehe Abbildung 2.17).

### 2.3.5 Die Umwandlung des Pions

Das positiv geladene Pion ist ein Meson, welches aus einem Up-Quark und eine Anti-Down-Quark zusammengesetzt ist. Mithilfe der Blasenkammeraufnahmen kann die Umwandlung eines solchen Pions untersucht werden. Das Spurmuster dieser Umwandlung ist leicht zu identifizieren und in Abbildung 2.18 gezeigt. Das positiv geladene Pion wandelt sich zunächst in ein Anti-Myon und ein Myon-Neutrino um:



Ruht das Pion vor der Umwandlung, so kann der Impuls des entstehenden Neutrinos mit dem theoretisch errechneten Wert verglichen werden, denn dann besitzen Anti-Myon und Myon-

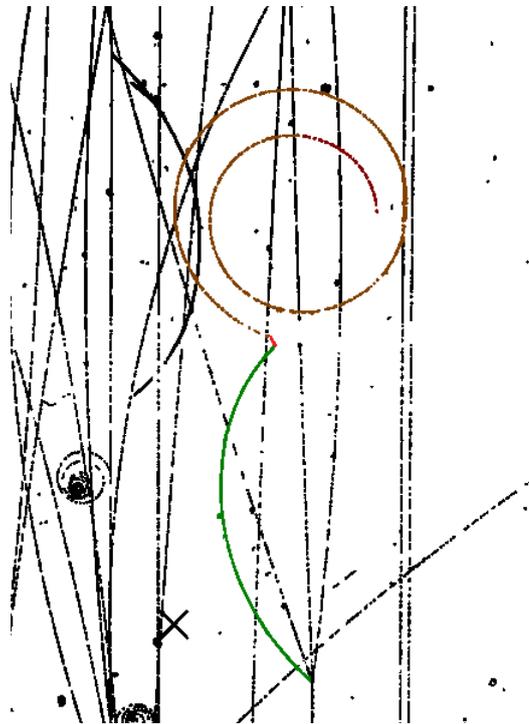
Neutrino betragsmäßig den gleichen Impuls. Nach dem Impulserhaltungssatz muss der Impuls vor und nach der Umwandlung gleich sein. Da das Pion ruht, gilt

$$\vec{0} = \vec{p}_\mu + \vec{p}_{\nu_\mu}$$

und somit

$$\vec{p}_\mu = -\vec{p}_{\nu_\mu}.$$

Die Beträge der beiden Impulse unterscheiden sich demnach nicht.



**Abbildung 2.18:** Ausschnitt aus der Blasenkammeraufnahme 2806: Das Spurmuster, welches bei der Umwandlung des Pions entsteht ist farbig hervorgehoben. Das positive Pion hat die grün hervorgehobene Spur hinterlassen. Die kurze, rot hervorgehobene Spur wurde vom Anti-Myon erzeugt und die spiralförmige Spur, welche braun hervorgehoben ist, stammt vom Positron.

Nach dem Energieerhaltungssatz und unter Beachtung der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung, wobei die Masse des Myon-Neutrinos vernachlässigbar klein ist, gilt dabei:

$$\begin{aligned} E_{\text{vorher}} &= E_{\text{nachher}} \\ E_{\pi^+} &= E_{\mu^+} + E_{\nu_\mu} \\ \sqrt{(m_\pi c^2)^2 + (p_\pi c)^2} &= \sqrt{(m_\mu c^2)^2 + (p_\mu c)^2} + p_{\nu_\mu} c \end{aligned}$$

Unter der Bedingung, dass das Pion ruht und somit das Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impulsbetrag besitzen, ergibt sich:

$$m_\pi c^2 = \sqrt{(m_\mu c^2)^2 + (p_\mu c)^2} + p_\mu c$$

Diese Gleichung muss nun umgestellt werden:

$$\begin{aligned} (m_\pi c^2 - p_\mu c)^2 &= (m_\mu c^2)^2 + (p_\mu c)^2 \\ (m_\pi c^2)^2 - 2m_\pi c^2 p_\mu c + (p_\mu c)^2 &= (m_\mu c^2)^2 + (p_\mu c)^2 \\ (m_\pi c^2)^2 - 2m_\pi c^2 p_\mu c &= (m_\mu c^2)^2 \\ p_\mu &= \frac{(m_\pi c^2)^2 - (m_\mu c^2)^2}{2m_\pi c^2} \cdot \frac{1}{c} \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Massen des Pions  $m_\pi$  und des Anti-Myons  $m_\mu$  lässt sich also der Wert für den Impuls  $p_\mu$  des Anti-Myons und damit des Myon-Neutrinos errechnen:

$$p_\mu = 30 \frac{\text{MeV}}{c}$$

Durch Messung kann der Impuls des Anti-Myons ebenfalls bestimmt werden. Dabei ist die Bestimmung des Impulses über die Reichweite zu bevorzugen, da die Spur, welche das Anti-Myon hinterlassen hat, sehr kurz ist. Anschließend wird der gemessene mit dem berechneten Impuls verglichen. Bei einer guten Übereinstimmung der beiden Werte kann geschlossen werden, dass das Pion tatsächlich bei der Umwandlung ruhte.

Im Anschluss an diese Umwandlung ereignet sich eine weitere. Das Anti-Myon wandelt sich in ein Positron und weitere Neutrinos um

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Die Neutrinos, welche keine elektrische Ladung besitzen, hinterlassen keine Spuren in der Blasen-kammer. Die Entstehung elektrisch neutraler Teilchen bei dieser Umwandlung ist dennoch deutlich erkennbar. Würde nur das Positron entstehen, dann müsste sich dieses aufgrund des Impulserhaltungssatzes in die gleiche Richtung weiterbewegen, wie das Anti-Myon. Es ist allerdings ein deutliches Abknicken der Spur erkennbar. Es müssen also neutrale Teilchen bei der Umwandlung entstanden sein. Aus der Erhaltung der schwachen Ladung folgt, dass zwei Neutrinos entstanden sein müssen.

Eine ähnliche Umwandlung kann sich auch mit einem negativ elektrisch geladenen Pion vollziehen:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

mit der nachfolgenden Umwandlung des Myons

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

In der Blasenkammer wird diese Umwandlung jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit nicht beobachtet, weil das negative Pion eher aufgrund seiner elektrischen Ladung mit einem Proton wechselwirkt (vgl. Seul 2009, S. 11):

$$p\pi^- \rightarrow n\pi^0.$$

# 3 Didaktische Analyse

In diesem Kapitel werden die didaktischen Hintergründe der erstellten Materialien analysiert. Es erfolgt dazu zunächst eine Betrachtung zum Einsatz von Medien im Physikunterricht mit speziellem Fokus auf die Medientypen, welche die Materialien beinhalten. Im Anschluss daran werden die Potenziale der Materialien hinsichtlich der Erzeugung von Motivation und des Lernens über die Physik als Wissenschaft erörtert. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die allgemeinen Lernvoraussetzungen und Lernziele der Materialien dargelegt.

## 3.1 Didaktische Begründung

Die Materialien, welche im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, umfassen digitale GeoGebra-Arbeitsblätter und begleitende, analoge Arbeitsblätter. Die Basis dieser Materialien bilden Blasenkammeraufnahmen, welche am CERN aufgenommen wurden und durch die Schülerinnen und Schüler mithilfe der Materialien ausgewertet werden.

### 3.1.1 Medien im Physikunterricht

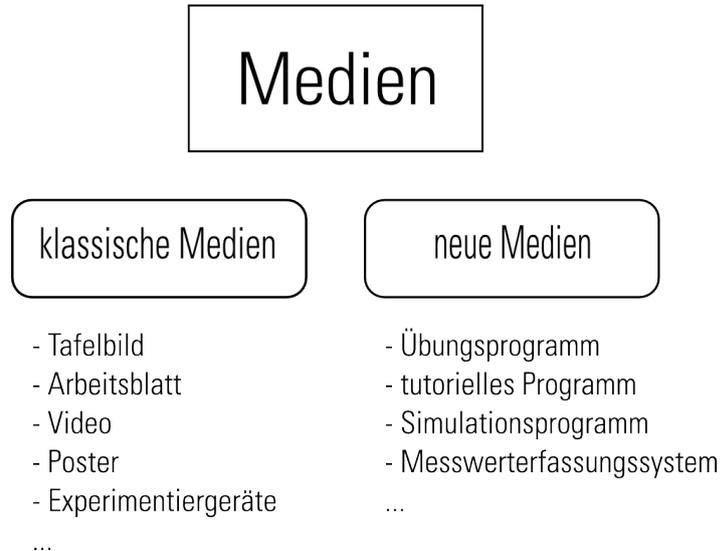
Die Kombination verschiedener Medientypen bei den Materialien macht eine didaktische Betrachtung des Medieneinsatzes im Physikunterricht notwendig. Der Begriff *Medien* besitzt in unterschiedlichen Kontexten verschiedene Bedeutungen. In der Didaktik werden unter Medien Hilfsmittel für die Vermittlung und Veranschaulichung der Lerninhalte verstanden. Eine genaue Definition liefert Girwidz (Girwidz 2009a, S. 205):

„Unterrichtsmedien sind nichtpersonale Informationsträger. Sie sind Hilfsmittel für den Lehrer oder Lernmittel in der Hand des Schülers.“

Ein Aspekt, welcher bei dieser Definition bereits angedeutet wird, ist die Unterscheidung von Medien hinsichtlich der Aktivitäten, welche sie auf Seiten der Schülerinnen und Schüler veranlassen. Einige Medien dienen als Hilfsmittel für den Lehrenden und werden daher nur passiv vom Lernenden betrachtet bzw. aufgenommen. Als Beispiel können hier Tafelbilder, Poster oder Videos genannt werden. Andere Medien, wie beispielsweise Arbeitsblätter, werden vom Lernenden aktiv selbst bearbeitet. Medieneinsatz im Unterricht verhilft nicht von vornherein zu einer besseren Unterrichtsqualität, sondern die aktive Auseinandersetzung mit den Medien und eine sinnvolle Einbindung in den Unterrichtsgang sind lernrelevant (vgl. ebd., S. 209). Die

erstellten Materialien zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine hohe Schüleraktivität fordern. Dennoch ist es notwendig, dass die Bearbeitung der Materialien im Unterricht begleitet und in diesen eingebettet wird (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4).

Die Klassifizierung von Medien kann anhand verschiedener Merkmale geschehen. Man unterscheidet beispielsweise klassische und sogenannte neue Medien. Einige Beispiele sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien sind eine Kombination von klassischen und neuen Medien.



**Abbildung 3.1:** Klassifikation von Medien

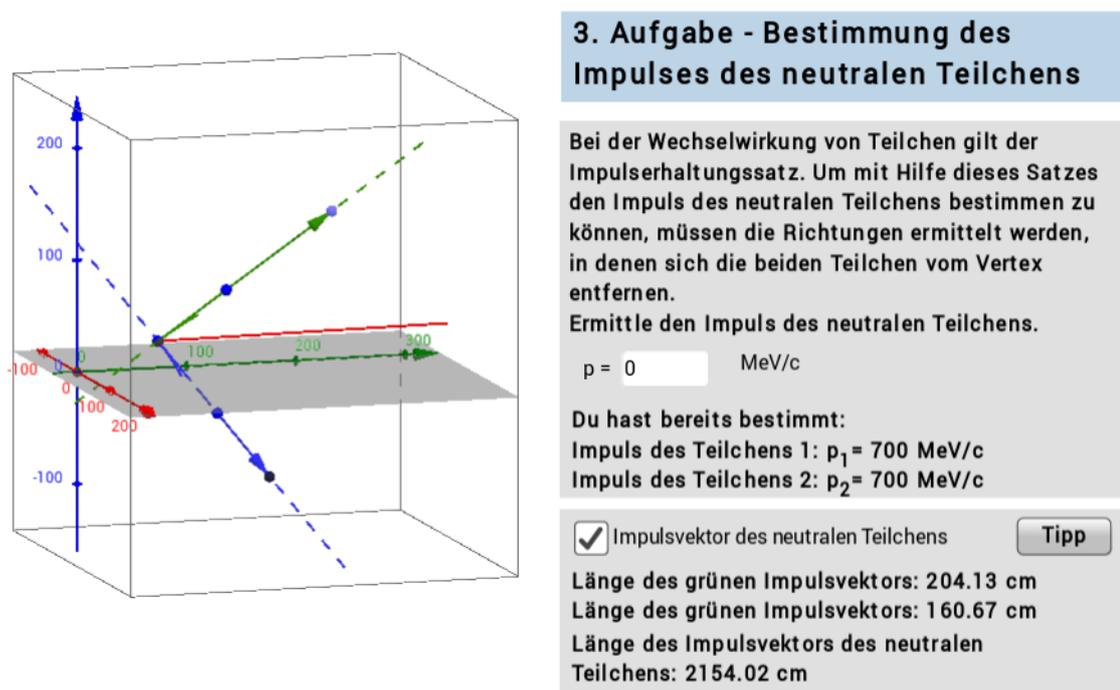
### Die GeoGebra-Applets

Den Kern der Materialien bilden die GeoGebra-Applets. GeoGebra ist eine dynamische Geometrie- und Mathematiksoftware, welche kostenlos für nicht kommerzielle Zwecke verwendet werden kann. Mithilfe von GeoGebra können Unterrichtsmaterialien in Form von Webseiten mit Applets erstellt und über GeoGebra-Tube bereitgestellt werden. Die Applets lassen sich den neuen Medien zuordnen. Neue Medien zeichnen sich insbesondere durch die folgenden drei Eigenschaften aus (vgl. Girwidz 2004, S. 9):

- Multimodalität,
- Multicodierung und
- Interaktivität.

Multimodalität meint dabei, dass verschiedene Sinnesbereiche durch die Medien angesprochen werden können (vgl. ebd., S. 9). Bei den erstellten Materialien wird dieses Potential von neuen Medien nicht ausgenutzt, da die Inhalte lediglich visuell präsentiert werden. Die beiden anderen Charakteristika sind bei den erarbeiteten Materialien jedoch zu finden.

Der Begriff Multicodierung bezieht sich darauf, dass die Inhalte durch verschiedene Möglichkeiten, beispielsweise in Text- oder Bildform, dargestellt werden (vgl. ebd., S. 10). Eine Kombination von Text- und Bildmaterial ist in den Applets stets gegeben. Bei der Anwendung des Impulserhaltungssatzes wird insbesondere die Möglichkeit ausgenutzt, den gleichen Zusammenhang in verbaler und bildlicher Form dazustellen. Die folgende Abbildung verdeutlicht dies.



**Abbildung 3.2:** Darstellung des Impulses: In der 3D-Ansicht werden die Impulsvektoren dargestellt. Der grüne und der blaue Vektor entsprechen den Impulsvektoren der elektrisch geladenen Teilchen. Der rote Vektor entspricht dem Impulsvektor des neutralen Teilchens. Im Text kann die genaue Länge abgelesen werden. Entsprechend eines selbst gewählten Maßstabes können die Längen des blauen und des grünen Vektors eingestellt werden.

Interaktivität bezieht sich auf die Wechselbeziehung zwischen den Lernenden und dem Medium: die Modifikation und Erstellung von Inhalten durch die Lernenden, die Kontrolle über den eigenen Lernprozess, die Reaktion des Programms auf Eingaben der Lernenden oder das Anbieten von Hilfestellungen (vgl. ebd., S. 10). In der Interaktivität liegt wohl die größte Stärke der erstellten Materialien. Für die Lösung der Aufgaben ist es notwendig, dass die Schülerinnen und Schüler innerhalb der GeoGebra-Applets unter Nutzung der vorhandenen Werkzeuge geometrische Messungen und Konstruktionen durchführen. Dabei stehen Hilfestellungen in Form von Tipps zur Verfügung, welche optional genutzt werden können. Auf eingegebene Antworten reagieren die Applets mit entsprechendem Feedback. Damit erfüllen die Applets einige der genannten Merkmale hinsichtlich der Interaktivität und nutzen damit insbesondere dieses Potenzial von neuen Medien. Die sich daraus ergebenden Vorteile bestehen vor allem darin, dass die Lernenden durch eine aktive Auseinandersetzung mit den Inhalten ihr Wissen flexibel

machen (vgl. Girwidz 2009a, S. 215) und ihre Motivation gestärkt wird (vgl. Girwidz 2009b, S. 426).

Innerhalb der erstellten Applets werden also Aufgaben gestellt, die Antworten der Schülerinnen und Schüler registriert und ein entsprechendes Feedback gegeben. Dieser Ablauf ist typisch für Übungsprogramme (vgl. ebd., S. 424). Die Aufgaben sind dabei so konzipiert, dass sie den Schülerinnen und Schülern bereits bekannte Konzepte im Kontext der Teilchenphysik anwenden und die Erarbeitung neuer Zusammenhänge ermöglichen. Beispielsweise wird beim Arbeitsblatt 2806 (Anhang E) die Kenntnis des Energie- und Impulserhaltungssatzes vorausgesetzt. Mithilfe des Arbeitsblattes lernen die Schülerinnen und Schüler dann, welche Schlussfolgerungen mithilfe dieser Erhaltungssätze über die Entstehung neutraler Teilchen bei der Umwandlung eines Pions gezogen werden können. Die Aufgaben können damit als Lernaufgaben klassifiziert werden, denn sie erfüllen einige der von Leisen genannten Merkmale (vgl. Leisen 2006, S. 263):

- Die Lernenden erarbeiten neue Inhalte.
- Das Lerntempo ist variabel.
- Die Rolle des Lehrenden besteht darin, den Schülerinnen und Schülern individuelle Hilfestellungen zu geben.

Da die Aufgaben oft aufgrund der Komplexität der Inhalte recht kleinschrittig angeleitet sind, lassen die Aufgaben nur eingeschränkt individuelle Bearbeitungswege zu.

### **Die Arbeitsblätter**

Begleitend zu den GeoGebra-Applets werden analoge Arbeitsblätter bereit gestellt. Diese Arbeitsblätter verfolgen zwei wesentliche Ziele: Einerseits bieten sie den Lernenden die Möglichkeit ihre Ergebnisse dauerhaft festzuhalten und so auch nach Beendigung der Arbeit mit den GeoGebra-Applets zugänglich zu machen. Andererseits sind auf den analogen Arbeitsblättern weiterführende Fragen gestellt, welche nicht durch automatisierte Antwortüberprüfung kontrollierbar sind. Dabei handelt es sich überwiegend um Begründungen und Schlussfolgerungen. Teilweise können auch längere Rechenwege auf den Arbeitsblättern notiert werden. Diese Aufgaben bieten Möglichkeiten für Diskussionen innerhalb des Plenums (vgl. Kapitel 4.4). Die Funktion eines Arbeitsblattes innerhalb des Lernprozesses kann in der Information, der Vertiefung oder der Kontrolle bestehen (Girwidz 2009a, S. 230). Den Arbeitsblättern in dieser Arbeit kommt eine vertiefende Funktion zu.

<p><b>1. Aufgabe - Charakteristika eines Neutronensterns</b></p> <p>Überlege, welche Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen und wie viele einlaufende Spuren es demnach gibt. Gib die Anzahl einlaufender Spuren an.</p> <p>Die Anzahl beträgt: _____</p> <p>Begründe deine Antwort.</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>
---

**Abbildung 3.3:** Weiterführende Frage auf dem analogen Arbeitsblatt: Dieser Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt zur Untersuchung von Neutronensternen zeigt ein Beispiel für eine vertiefende Frage, welche auf dem analogen Arbeitsblatt ergänzend gestellt wird. An anderen Stellen werden beispielsweise auch Rechenwege abgefragt.

### Die Blasenkammerbilder

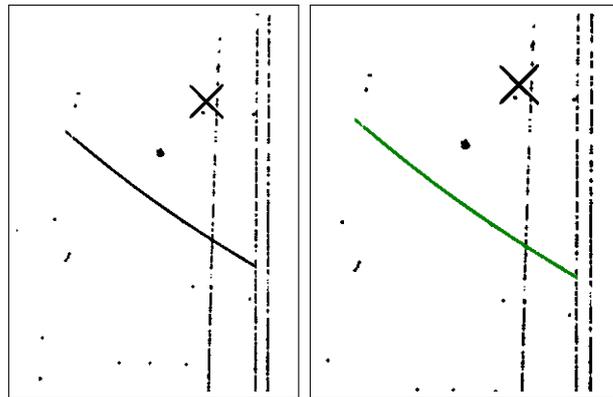
Da in den Aufgaben die Auswertung von Blasenkammeraufnahmen erfolgt, wird abschließend eine kurze allgemeine Charakterisierung des Mediums Bild gegeben. Unabhängig davon, in welcher Form ein Bild dargestellt wird (auf einem Arbeitsblatt, als Poster, innerhalb eines Applets), ergeben sich typische Merkmale. So können Bilder klassifiziert werden in Abbildungen, logische Bilder und analoge Bilder. Während Abbildungen die äußerlichen Merkmale eines Objektes wiedergeben, stellen analoge Bilder nicht beobachtbare Phänomene und logische Bilder die Schematik von Objekten bzw. Prozessen dar (vgl. ebd., S. 218). Die Blasenkammeraufnahmen sind den Abbildungen zuzuordnen, weil es sich um Fotografien handelt, welche die durch die Ionisation entstandenen Teilchenspuren zeigen.

Beim Einsatz von Medien in Lernszenarien sollte der Wahrnehmung und Verarbeitung der aufgenommenen Informationen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Girwidz schreibt dazu (Girwidz 2004, S. 16):

„Aufgrund der begrenzten Verarbeitungskapazitäten muss das Informationsangebot so strukturiert werden, dass die Belastung des Arbeitsgedächtnisses nicht zu hoch wird. Jede zusätzliche Belegung kognitiver Ressourcen verringert den Anteil, der für das Lernen zur Verfügung steht.“

Schülerinnen bzw. Schüler, welche das erste Mal mit Blasenkammerbildern konfrontiert werden, können wahrscheinlich noch keinerlei Informationen aus den darauf zu sehenden Spurmustern entnehmen. Schrittweise müssen die Vorgehensweise bei der Auswertung erarbeitet und physikalische Zusammenhänge angewendet werden. Um eine Fokussierung der Aufmerksamkeit der Lernenden auf die jeweils betrachtete Spur zu erlangen, wurden diese farblich hervorgehoben.

Die Spuren selbst sind auf den Aufnahmen nicht farbig, sondern die Bilder wurden bearbeitet. Des Weiteren erfolgt an vielen Stellen in den Applets ein automatischer Zoom, sodass die betrachtete Spur gut für die Lernenden sichtbar wird. Da die Lernenden die Materialien in selbstständiger Eigenarbeit durchlaufen können, ist es wichtig, dass die eigentlich dem Lehrenden obliegenden Pflicht, die Aufmerksamkeit zu fokussieren und das Informationsangebot zu dosieren (vgl. Girwidz 2009a, S. 214), durch das Aufgabendesign selbst gegeben ist.



**Abbildung 3.4:** Farbige Hervorhebung der Spuren: In der Originalaufnahme sind alle Spuren schwarz (links). In den Materialien werden Spuren, welche gerade im Mittelpunkt der Untersuchung stehen, farbig hervorgehoben (rechts).

### 3.1.2 Erzeugung von Motivation durch Authentizität und Kollaboration

Der Prozess des Lernens wird durch affektive Faktoren, wie die Motivation, das Interesse, das Selbstkonzept oder innere Einstellungen beeinflusst (Rabe 2010, S. 1):

„Sie bestimmen alle Phasen eines Lernprozesses, nämlich die Aktivierung zum Lernen, die Orientierung und Richtung des Lernprozesses sowie schließlich das langfristige Ergebnis.“

Bei der Gestaltung von Unterrichtsmaterialien müssen sie deshalb ebenso eine Beachtung finden wie beispielsweise die fachliche Korrektheit oder die methodische Umsetzung. Welche Potenziale bieten in diesem Bereich Materialien zur Auswertung von Blasenkammeraufnahmen? Zwei Aspekte sind dabei hervorzuheben:

- Es handelt sich um originale Blasenkammerbilder, mit welchen die Forscher die Weiterentwicklung der Teilchenphysik vorangetrieben haben. Die Materialien zeichnen sich dadurch durch eine hohe *Authentizität* aus.
- Ein wesentlicher Bestandteil physikalischer Forschung besteht in der Zusammenarbeit zwischen Physikern. Beim Einsatz der Materialien in der Schule ist an den geeigneten

Stellen durch *Kollaboration* und Austausch der Lernenden untereinander darauf aufzubauen.

Der Lernerfolg kann durch eine auf Selbstbestimmung beruhenden Motivation, d.h. Ausrichtung des Verhaltens auf ein zu erreichendes Ziel, positiv beeinflusst werden (vgl. Deci/Ryan 1993, S. 236). Kann beim Lernenden also eine solche Motivation erzeugt werden, so wird der Lernprozess unterstützt und die Lerninhalte stärker verinnerlicht. Nach der Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan wird Motivation dadurch erzeugt, dass ein Mensch die drei grundlegenden Bedürfnisse:

- das Bedürfnis nach Kompetenz,
- das Bedürfnis nach Autonomie und
- das Bedürfnis nach sozialer Eingebundenheit,

zu befriedigen sucht (vgl. ebd., S. 229). Das Bedürfnis nach Kompetenz kann dadurch bedient werden, dass den Lernenden ermöglicht wird, Erfolgserlebnisse zu erzielen. Wichtig ist dabei, dass sich diese aus ihrem eigenständigen Tun ergeben. Aufgaben, welche die Schülerinnen und Schüler zu bewältigen haben, dürfen dabei aber auch nicht zu leicht sein, um motivationsfördernd zu sein (vgl. ebd., S. 231). Bei den Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen auf erhöhtem Anforderungsniveau sind die Aufgaben so gestaltet, dass sie im Leistungskurs der Oberstufe eingesetzt werden können. Die Materialien zeichnen sich größtenteils durch einen hohen Anteil an quantitativen Aufgaben aus. Um das Kompetenzerleben zu fördern, ist in den digitalen Arbeitsblättern eine Feedback-Funktion integriert, die dem Lernenden mitteilt, ob die Antwort korrekt ist. So kann im Laufe der Bearbeitung jede Schülerin bzw. jeder Schüler individuell nachvollziehen, wo Verständnisprobleme bestehen und gezielt seine Überlegungen hinterfragen. Bei falschen Antworten wird oft zusätzlich darauf hingewiesen, welche Aspekte nicht beachtet wurden und so zur falschen Antwort führten. Außerdem stehen Tipps zur Verfügung, welche optional eingeblendet werden können.

Die Arbeitsblätter sind so konzipiert, dass die Schülerinnen und Schüler sie selbstständig bearbeiten können. Es ist keine Lenkung durch die Lehrperson notwendig. Dies entspricht der Forderung nach Autonomie zur Förderung der Motivation. Gleichzeitig unterstützt auch die Arbeit mit authentischen Materialien das Autonomiegefühl. In der Schule werden oft nur vereinfachende Experimente durchgeführt oder mit speziell konzipierten Versuchsapparaten gearbeitet, um so die Komplexität zu verringern. Die Lernenden werden also stets in die Situation versetzt, dass ein Lehrender das Experiment für sie vorbereitet und damit die Autonomie der Lernenden eingrenzt. Bei der Arbeit mit originalen Materialien erfahren die Schülerinnen und Schüler damit mehr Selbstbestimmung. Außerdem ist dadurch auch das Kompetenzerleben zusätzlich gestärkt, da sie wie die Physikerinnen bzw. Physiker arbeiten. Einschränkend ist an dieser Stelle anzumerken, dass für die Materialien Blasenkammeraufnahmen vorausgewählt

wurden, welche bestimmte Prozesse gut zeigen.

Die dritte Forderung nach sozialer Eingebundenheit ergibt sich in der Nachbereitung der Materialien. An verschiedenen Stellen bieten sich Möglichkeiten, um in Partnerarbeit oder im Plenum über die Ergebnisse zu diskutieren bzw. zu reflektieren, warum unterschiedliche Lösungen oder Lösungswege möglich sind (siehe Kapitel 4.4).

### 3.1.3 Lernen über die Physik als Wissenschaft

Die Physik als Wissenschaft zeichnet sich durch einen Komplex an Inhalten und Erkenntnissen, ein Gefüge von Methoden zur Erlangung dieses Wissens und eine spezifische Denkweise aus. Das Ziel des Physikunterrichts sollte deshalb ebenfalls darin bestehen diese drei Komponenten zu vermitteln bzw. auszubilden. Allein das Lehren der physikalischen Inhalte reicht nicht aus für eine umfassende physikalische Bildung. Neben der Erarbeitung von Fachwissen und zugrundeliegenden Basiskonzepten, spielt auch das Lernen darüber, wodurch physikalische Denk- und Arbeitsweisen geprägt sind, eine wichtige Rolle (vgl. Hopf/Wiesner/Schecker 2011, S. 16).

In den nationalen Bildungsstandards und den Einheitlichen Prüfungsanforderungen, sind aus diesem Grund bereits neben dem Inhaltsbereich Fachwissen auch die Bereiche Erkenntnisgewinnung bzw. Fachmethoden, Kommunikation und Reflexion fest verankert. Es werden dadurch sowohl die Inhalts- als auch die Handlungsdimension des Physikunterrichts erfasst. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien bieten einen Ausgangspunkt für die Vermittlung von Kompetenzen in allen vier Bereichen (siehe Kapitel 4.1). Insbesondere wird das Lernen über physikalische Erkenntnismethoden durch die Arbeit mit authentischen Materialien und das Nachvollziehen originaler Vorgehensweisen gefördert.

Der Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung umfasst einerseits die naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen und andererseits die Vorstellungen darüber, was physikalische Erkenntnisse sind (vgl. Mikelskis-Seifert/Duit 2010, S. 1). Letzteres wird in der Didaktik auch als „Nature of Science“ bezeichnet. Als zentrale physikalische Arbeitsweisen können das Generieren von Hypothesen, die Planung und Durchführung von Experimenten und die Interpretation der experimentellen Daten angesehen werden (vgl. ebd., S. 2). Abhängig von Untersuchungsgegenstand und Fragestellung gliedern sie sich in weitere Teilschritte und erfolgen unter Umständen mehrfach hintereinander. In den Materialien wird dieser Erkenntnisweg auch exemplarisch durchlaufen. Beispielsweise werden bei der Untersuchung der inelastischen Proton-Proton-Streuung (siehe Anhang F) zunächst Hypothesen aufgestellt, welche die bekannten Gesetzmäßigkeiten der Ladungserhaltung berücksichtigen. Anschließend werden die Impulse der Teilchen bestimmt, um letztendlich eine Aussage treffen zu können, welche Hypothese bestätigt werden kann.

		Kompetenzbereiche			
		Fachwissen	Erkenntnisgewinnung/ Fachmethoden	Kommunikation	Bewertung/Reflexion
Anforderungsbereiche	I	Kenntnisse und Konzepte Ziel gerichtet wiedergeben	bekannte Untersuchungsmethoden und Modelle beschreiben, Untersuchungen nach Anleitung durchführen	bekannte Informationen in verschiedenen fachlich relevanten Darstellungsformen erfassen und wiedergeben	vorgegebene Argumente zur Bewertung eines Sachverhaltes erkennen und wiedergeben
	II	Kenntnisse und Konzepte auswählen und anwenden	geeignete Untersuchungsmethoden und Modelle zur Bearbeitung überschaubarer Sachverhalte auswählen und anwenden	Informationen erfassen und in geeigneten Darstellungsformen situations- und adressatengerecht veranschaulichen	geeignete Argumente zur Bewertung eines Sachverhaltes auswählen und nutzen
	III	komplexere Fragestellungen auf der Grundlage von Kenntnissen und Konzepten planmäßig und konstruktiv bearbeiten	geeignete Untersuchungsmethoden und Modelle zur Bearbeitung unbekannter Sachverhalte begründet auswählen und anpassen	Informationen auswerten, reflektieren und für eigene Argumentationen nutzen	Argumente zur Bewertung eines Sachverhaltes aus verschiedenen Perspektiven abwägen und Entscheidungsprozesse reflektieren

**Abbildung 3.5:** Kompetenzmatrix der Bildungsstandards. Quelle: Leisen 2006, S. 261.

Das Lernen und Lehren über die Natur der Naturwissenschaften, welches ebenfalls einen Bestandteil des Physikunterrichts darstellt, umfasst drei Bereiche: die Behandlung erkenntnistheoretischer Probleme, die Wissenschaftstheorie und wissenschaftsethische Fragestellungen (vgl. Kircher 2009, S. 774). Insbesondere im Bereich der Wissenschaftstheorie bieten die erstellten Materialien einen Anknüpfungspunkt, denn die „naturwissenschaftliche Methodologie ist sowohl ein inhaltliches Element des Physikunterrichts, als auch eine Grundlage für wissenschaftstheoretische Reflexionen“ (ebd., S. 763). Zur Illustration wissenschaftstheoretischer Aspekte kann das Experiment dienen. In den Materialien wird zwar selbst kein Experiment durchgeführt, aber es werden originale experimentelle Daten (in Form der Blasenkameraaufnahmen) ausgewertet. Dabei spielen vor allem bei den Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau quantitative Betrachtungen eine zentrale Rolle. Kircher sieht die entscheidende Rolle der quantitativen Experimente in der Demonstration des Verhältnisses von Theorie und Experiment, der Bedeutung physikalischer Experimente für die Weiterentwicklung von Technik und Physik, des Ringens um sinnvolle Daten und deren Interpretation und der Bedeutung von genauem und sorgfältigem Experimentieren (vgl. ebd., S. 796). In den Materialien wird das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment dadurch hervorgehoben, dass ohne gründliche Vorüberlegung und Hypothesenbildung keine Schlussfolgerungen möglich sind. Allein das Messen des Impulses lässt beispielsweise noch keine Schlussfolgerung darüber zu, welches Teilchen die Spur hinterlassen hat. Erst die Betrachtung der anderen Spuren, der Impulse der anderen beteiligten Teilchen und eine genaue Überlegung bzgl. Ladungserhaltung lassen Schlüsse zu. Die Lernenden können dabei nachvollziehen, welchen Schwierigkeiten die Forscher gegenüber-

standen als sie die Blasenkammeraufnahmen auswerteten.

## 3.2 Lernvoraussetzungen und Lernziele

Aus den didaktischen Überlegungen ergeben sich die übergeordneten Lernziele der Materialien, welche in diesem Abschnitt erläutert werden. Damit die Materialien sinnvoll bearbeitet werden können, sind einige Voraussetzungen hinsichtlich des Vorwissens auf Seiten der Lernenden zu beachten. Auch dazu wird hier ein zusammenfassender Überblick gegeben. Dabei spielt auch das Verhältnis der erstellten Materialien zu den Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau eine Rolle.

### 3.2.1 Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden Materialien für den Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf erhöhtem Anforderungsniveau erarbeitet. In einer anderen Arbeit wurden entsprechende Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau erstellt (vgl. Schmidt 2015). Als Voraussetzung für das Verständnis und die Bearbeitung der Aufgaben auf erhöhtem Anforderungsniveau ist es notwendig, dass einige der grundlegenden Materialien bearbeitet werden. In Kapitel 4.4 wird ausführlich erläutert, welche Aufgaben und Arbeitsblätter das genau betrifft.

Das Wissen der Lernenden im Bereich der Teilchenphysik soll mithilfe der Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau über die Diskussion der Atombausteine (Elektron, Proton, Neutron) und Photonen hinaus erweitert werden. Während in den Materialien des grundlegenden Anforderungsniveaus Prozesse auf den Blasenkammeraufnahmen betrachtet werden, bei welchen sich die beteiligten Teilchen vorrangig auf die genannten beschränken, werden bei den Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau auch weitere Teilchen kennengelernt. Ein Arbeitsblatt (siehe Anhang E) untersucht beispielsweise die Umwandlung eines positiv geladenen Pions:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

und die daran anschließende Umwandlung

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Anhand der Prozesse, welche exemplarisch untersucht werden, erfolgt eine Diskussion verschiedener Erhaltungssätze. Neben dem Impulserhaltungssatz stehen auch der Ladungs- und Energieerhaltungssatz im Fokus. Hinsichtlich der Berechnungen unterscheiden sich die Materialien vor allem dadurch vom grundlegenden Anforderungsniveau, dass stets die Dreidimensionalität der Aufnahmen beachtet wird. Es ergibt sich damit insgesamt ein höherer Anteil an quantitativen Aufgaben als in den Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau.

### 3.2.2 Zusammenfassung der Lernvoraussetzungen und Lernziele

In diesem Abschnitt werden die übergeordneten Lernvoraussetzungen und Lernziele, welche den Materialien zugrunde liegen, erläutert. Es wird dabei nicht auf jedes einzelne Lernziel, welches durch die Materialien erreicht werden soll, eingegangen, sondern es werden Ziele formuliert, welche sich aus der Nutzung der Materialien im Unterricht insgesamt ergeben. Jeder Teil der Materialien enthält zusätzlich didaktische Hinweise (vgl. z.B. S. 95). In diesen Hinweisen befinden sich die genauen Angaben von Lernzielen und benötigtem Vorwissen speziell für das entsprechende Material.

Für die Arbeit mit den Materialien werden insbesondere in den folgenden fünf Bereichen Grundkenntnisse vorausgesetzt:

- **Struktur und Aufbau der Materie**  
Atom-/Molekülebene, Elementarteilchen, Masse und die drei Ladungen als elementare Eigenschaften, Begriffe Detektor und Teilchenstrahl
- **Bewegung geladener Teilchen im magnetischen Feld**  
Magnetfeld, Darstellung eines Magnetfelds durch Magnetfeldlinien, Lorentzkraft, Bestimmung der Richtung der Lorentzkraft (Rechte-Hand-Regel), Bewegung auf Kreisbahn (Radialkraft)
- **Erhaltungssätze bei physikalischen Prozessen**  
Erhaltung der Energie, Erhaltung des Impulses, Erhaltung der Ladungen
- **Spezielle Relativitätstheorie**  
Äquivalenz von Masse und Ruheenergie, relativistischer Impuls, relativistische Energie-Impuls-Beziehung
- **Mathematik**  
vektorielle Addition, Strahlensätze, Satz des Pythagoras, geometrische Begriffe (z.B. Mittelsenkrechte, Sehne)

Punktuell kann es sein, dass die geforderten Voraussetzungen nicht im klassischen Physikunterricht thematisiert werden. Insbesondere im Bereich der Teilchenphysik ist ein Einblick über das in den meisten Lehrplänen geforderte Wissen hinaus notwendig. So wird beispielsweise in den Materialien vorausgesetzt, dass die Lernenden wissen, dass es neben der elektrischen Ladung noch die schwache Ladung gibt, welche ein Teilchen charakterisiert und ebenfalls bei Umwandlungsprozessen erhalten bleibt.

Daneben wird, wie in Kapitel 3.2.1 erläutert und in Kapitel 4.4 aufgeschlüsselt, grundlegendes Wissen hinsichtlich der Funktionsweise von Blaskammern und Teilchenidentifikation auf Blaskammeraufnahmen benötigt, welches durch die Bearbeitung einiger der Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau sichergestellt werden kann.

Die übergeordneten Lernziele, welche durch die Bearbeitung der Materialien realisiert werden sollen, sind in der nachfolgenden Tabelle aufgezählt. Für die Betrachtung der Lernziele erfolgt eine Unterscheidung in kognitive und affektive Lernziele.

Kognitive Lernziele	Affektive Lernziele
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Lernenden beschreiben neben den Atombausteinen weitere Elementarteilchen und zusammengesetzte Teilchen anhand ihrer Eigenschaften.</li> <li>• Die Schülerinnen und Schüler stellen Hypothesen für Teilchenumwandlungen, welche auf Blaskammeraufnahmen sichtbar sind, auf und testen diese hinsichtlich der Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Ladungen.</li> <li>• Sie wenden die Methoden der Impulsbestimmung aus dem Krümmungsradius einer Spur und der Reichweite eines Teilchens situationsabhängig an.</li> <li>• Die Lernenden skizzieren den Prozess der physikalischen Erkenntnisgewinnung.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Lernenden erkennen die Notwendigkeit der Anwendung theoretischer Konzepte bei der Auswertung experimenteller Daten an.</li> <li>• Die Schülerinnen und Schüler beachten die Erfordernis des Austausches zwischen Forschern über Ergebnisse und der Diskussion über deren Eindeutigkeit.</li> </ul>

Im kognitiven Bereich gliedern sich die einzelnen Lernziele noch einmal in Teilziele auf, welche in den didaktischen Hinweisen der Materialien dargelegt sind. Insgesamt soll die Thematisierung von Blaskammeraufnahmen im Unterricht erreichen, dass die Lernenden sich auf eine anschauliche Art und Weise mit den Grundprinzipien der Teilchenphysik auseinandersetzen. Dazu gehört das Kennenlernen weiterer Teilchen neben den bereits bekannten wie z.B. Elektron oder Photon. Die Anwendung der Erhaltungssätze im Rahmen der Teilchenphysik bietet die Möglichkeit das Basiskonzept der Erhaltung von physikalischen Größen bei Prozessen in einem neuen Sachzusammenhang anzuwenden. Insbesondere bei der quantitativen Auswertung der Blaskammeraufnahmen spielen die Methoden der Impulsberechnung eine entscheidende Rolle. Hierbei wird deutlich, dass die Methode entsprechend der jeweiligen Situation ausgewählt werden muss, um zu einem sinnvollen und möglichst genauen Ergebnis zu kommen. Dieser Zusammenhang lässt sich auf andere physikalische Bereiche übertragen.

Auf affektiver Ebene fassen die Lernziele noch einmal zusammen, welche Ausgangspunkte sich für das Lernen über die Physik als Wissenschaft ergeben. Das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment wird bei der Auswertung der Blaskammeraufnahmen von den Lernenden

erlebt und kann entsprechend in der Nachbereitung im Unterrichtsgespräch auch diskutiert werden. Bei der Bearbeitung der Materialien werden die Lernenden auf authentische Weise mit den Auswerteverfahren konfrontiert, sodass sie den Prozess der physikalischen Erkenntnisgewinnung und die damit verbundenen Schwierigkeiten erkennen. Durch Diskussionen im Unterricht kann außerdem die Erkenntnis herausgearbeitet werden, dass Kommunikation und Kollaboration in der Physik und insbesondere in der Teilchenphysik eine wichtige Rolle spielen.



# 4 Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau

Das folgende Kapitel beschreibt die Materialien und deren Einsatzmöglichkeiten im Unterricht. Da sie bundeslandunabhängig einsetzbar sein sollen, erfolgt zunächst eine Einordnung in die Einheitlichen Prüfungsanforderungen für die Abiturprüfung, welche bundesweit als Leitfaden für den Physikunterricht der Oberstufe dienen. Teilweise ist die Teilchenphysik kein expliziter Bestandteil der einzelnen Lehrpläne. Der Ausführung, an welchen Punkten sich die Materialien dennoch sinnvoll einbetten lassen bzw. wo Anknüpfungspunkte bestehen, widmet sich der zweite Abschnitt. Im Anschluss daran wird der Aufbau und der Einsatz der Materialien erläutert. Außerdem werden einige Hinweise zu den technischen Voraussetzungen beschrieben.

## 4.1 Einordnung in die Einheitlichen Prüfungsanforderungen für die Abiturprüfung

Die von der Kultusministerkonferenz herausgegebenen Einheitlichen Prüfungsanforderungen (EPA) formulieren Kompetenzen, welche die Schülerinnen und Schüler nach Beendigung der gymnasialen Oberstufe besitzen sollen. Da die im Rahmen dieser Masterarbeit erstellten Materialien für den Einsatz im Leistungskurs der Oberstufe konzipiert sind, erfolgt an dieser Stelle eine Einordnung der Materialien in die EPA. Die EPA gliedern sich in die Beschreibung der Kompetenzen und der fachlichen Inhalte, an welchen die Kompetenzen überprüft werden sollen. Die Kompetenzen werden dabei den vier Kompetenzbereichen Fachkenntnisse, Fachmethoden, Kommunikation und Reflexion zugeordnet (vgl. auch Kapitel 3.1.3). Die folgenden Ausführungen orientieren sich an dieser Gliederung.

### **Kompetenzbereich Fachkenntnisse**

Eine der geforderten Kompetenzen in diesem Bereich bezieht sich auf physikalische Grundprinzipien sowie „zentrale historische und erkenntnistheoretische Gegebenheiten“ (Kultusministerkonferenz 2004, S. 3). Zu den Grundprinzipien zählen die Erhaltungssätze, welche in den Materialien für die Auswertung der Blasenkammeraufnahmen benötigt werden. Dabei sind insbesondere der Energieerhaltungssatz, der Impulserhaltungssatz und die Erhaltung der Ladungen von zentraler Bedeutung. Die Materialien können damit zur Ausbildung dieser Kom-

petenz beitragen, indem die genannten Erhaltungssätze im Bereich der Teilchenphysik angewendet und vertieft werden. Hinsichtlich des Wissens über historische Gegebenheiten können die Materialien einen Ausgangspunkt bilden, um etwas über die Entwicklungen im Bereich der Detektionsmöglichkeiten für Teilchen zu lernen.

### **Kompetenzbereich Fachmethoden**

In diesem Kompetenzbereich unterstützen die Materialien die Ausbildung verschiedener Kompetenzen. So wird in den EPA die Kompetenz gefordert, dass die Schülerinnen und Schüler Erfahrungen mit den Strategien der Erkenntnisgewinnung wie beispielsweise dem Formulieren von Hypothesen besitzen (vgl. Kultusministerkonferenz 2004, S. 3). Bei der Bearbeitung der Materialien müssen an verschiedenen Stellen Hypothesen aufgestellt und geprüft werden. Verdeutlicht wird dabei auch der Zusammenhang zwischen Theorie und Experiment: Ohne eine geeignete Hypothese, welche sich aus der Theorie ergibt, kann keine zielgerichtete Auswertung der Daten erfolgen. Das wiederum spiegelt sich auch in einer weiteren Kompetenz aus diesem Bereich wieder. So wird gefordert, dass die Lernenden die Charakteristika der „Methode der Physik“ kennen (ebd., S. 3). Dazu gehört auch, zu verstehen, in welchem Wechselspiel Theorie und Experiment stehen.

### **Kompetenzbereich Kommunikation**

Durch Nutzung der Diskussionsmöglichkeiten in der Nachbereitung der Arbeitsmaterialien (siehe Kapitel 4.4) kann auch die Ausbildung von Kompetenzen in diesem Bereich gefördert werden. Das Argumentieren zu physikalischen Fragestellungen wird dabei ebenso verlangt wie die Nutzung von Fachsprache. Die entspricht zwei der in den EPA geforderten Kompetenzen (vgl. ebd., S. 4). Der Kompetenzbereich bezieht sich nicht nur auf die gesprochene Kommunikation, sodass auch die Beantwortung der weiterführenden Fragen auf den analogen Arbeitsblättern für die Ausbildung der Kompetenzen als unterstützend angesehen werden kann. Allerdings muss dabei eine geeignete Kontrolle im Unterricht erfolgen.

### **Kompetenzbereich Reflexion**

Wie bereits in Kapitel 3.1.3 erläutert, bieten die Materialien Anknüpfungspunkte für die Reflexion über die Physik als Wissenschaft auf wissenschaftstheoretischer Ebene. Allerdings ist auch dafür die Nachbereitung der Materialien im Unterricht in Form von Diskussionen und Zusammenfassungen notwendig.

### **Fachliche Inhalte**

In den EPA werden die vier Sachgebiete Felder, Wellen, Quanten und Materie als Basisbereiche unterschieden (vgl. ebd., S. 4f.). Die Materialien, welche im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, lassen sich dem Bereich Materie zuordnen. „Grundlegende Merkmale der Struktur der

Materie und beispielhafte Untersuchungsmethoden“ sollen die Lernenden auf diesem Gebiet in der Oberstufe erwerben (ebd., S. 5). Die Materialien bieten hierbei die Möglichkeit aus Quarks zusammengesetzte Teilchen und weitere Elementarteilchen (wie beispielsweise das Anti-Myon) kennenzulernen und ihre Eigenschaften zu untersuchen. Sie vermitteln außerdem grundlegende Kenntnisse über Möglichkeiten zur Detektion von Teilchen am Beispiel der Blasenkammer. Auch aus dem Gebiet Felder werden in den Materialien Kenntnisse vertieft. Die EPA fordern, dass „[g]rundlegende Eigenschaften und Anwendungen von elektrischen Feldern, magnetischen Feldern und Gravitationsfeldern in einfachen Situationen“ behandelt werden (ebd., S. 4). Bei der Auswertung der Blasenkammerbilder spielt die Bewegung elektrisch geladener Teilchen im magnetischen Feld eine wichtige Rolle. Bereits bekanntes Wissen auf diesem Gebiet wenden die Lernenden in dem neuen Sachzusammenhang der Blasenkammer als Detektor an.

In den EPA wird auch die Aufgabe des Leistungskurses benannt: „die systematische, vertiefte und reflektierte wissenschaftspropädeutische Arbeit“ (ebd., S. 5). Es sollen dabei Fachmethoden selbstständig angewendet, übertragen und reflektiert, sowie dabei ein hoher Grad an Selbsttätigkeit gefordert werden (vgl. ebd., S. 6). Da die Materialien so konzipiert wurden, dass sie in selbstständiger Eigenarbeit von den Lernenden bearbeitet werden können, unterstützt der Einsatz der Materialien diese Ziele. Es werden dabei Möglichkeiten der Anwendung und Übertragung bekannter Prinzipien auf den Kontext der Detektion von Teilchen geschaffen.

## 4.2 Technische Voraussetzungen

Für die Bearbeitung der digitalen Bestandteile der Materialien ist es notwendig, dass Computer mit Internetzugang zur Verfügung stehen. Bestenfalls können die Lernenden einzeln an einem Rechner arbeiten. Die Bearbeitung ist aber auch in Partnerarbeit möglich. Da die digitalen Arbeitsblätter über GeoGebra-Tube zur Verfügung gestellt werden, ist keine Installation der GeoGebra-Software erforderlich. Es wird lediglich ein Webbrowser benötigt. In dem Webbrowser muss Java aktiviert sein. Bei Problemen mit der Anzeige der 3D-Ansicht, welche für die Bearbeitung einiger Arbeitsblätter (z.B. AB 2663 oder AB 2806) benötigt wird, sollte überprüft werden, ob die aktuelle Java-Version installiert ist.

Aufgrund der Größe der Applets ist eine Bildschirmauflösung von mindestens 1280 x 1024 sinnvoll. Dann sind die Texte in den Applets gut lesbar. Optimal ist eine Auflösung von 1600 x 1200 oder höher.

Es ist vorgesehen, dass die begleitenden analogen Arbeitsblätter und Zusatzmaterialien zu den GeoGebra-Applets den Lernenden in gedruckter Form zur Verfügung gestellt werden. Die Technik-Hilfsblätter können auch als PDF-Dokument auf den Rechnern bereit liegen, an welchen die Schülerinnen und Schüler arbeiten. Alternativ ist es möglich sie ein- oder zweimal zentral im Klassenraum auszulegen.

## 4.3 Einbettung in den Unterricht

Eine Einbettung der Materialien im Rahmen eines Lernbereichs zur Teilchenphysik ist sicherlich wünschenswert, doch nicht in allen Lehrplänen ist diese Thematik verpflichtend vorgesehen. In Bundesländern, in welchen die Teilchenphysik im Lehrplan verankert ist, kann der Einsatz im Rahmen dieser Thematik erfolgen, aber auch in den anderen Bundesländern lassen sich sinnvolle Anknüpfungspunkte im Lehrplan finden. So lassen sich die Materialien auch im Rahmen der Behandlung der Erhaltungssätze einsetzen<sup>1</sup>. Neben beispielsweise den kinematischen Anwendungen in der klassischen Mechanik, welche häufig im Unterricht diskutiert werden, kann durch die Nutzung der Materialien zur Blaskammer eine weitere Anwendung gezeigt werden. In den Materialien wird außerdem die Erhaltung der Ladungen als weiterer Erhaltungssatz thematisiert. Es ist dabei allerdings zu beachten, dass für die Materialien auch Vorwissen im Bereich der Speziellen Relativitätstheorie und des magnetischen Feldes benötigt werden (siehe Kapitel 3.2.2). Daraus ergibt sich eine weitere Möglichkeit der Einbettung. So können die Materialien auch im Rahmen der Behandlung der Eigenschaften und Wirkung des magnetischen Feldes behandelt werden<sup>2</sup>. Das Wissen über die Bewegung elektrisch geladener Teilchen im Magnetfeld kann dabei auf die Blaskammer übertragen werden. In ähnlicher Weise kann sich der Einsatz der Materialien auch der Behandlung der Speziellen Relativitätstheorie anschließen.

Da es sich bei den Materialien um eine abgeschlossene Einheit handelt, welche auch einige Zeit im Unterricht beansprucht, ist auch der Einsatz im Rahmen eines Projekts denkbar. Innerhalb einer Projektwoche zur Teilchenphysik kann beispielsweise auch ein Projekttag zur Blaskammer stattfinden. Da es auch Materialien zur Blaskammer auf grundlegendem Anforderungsniveau gibt (vgl. Schmidt 2015), ist eine Beteiligung aller Schülerinnen und Schüler der Oberstufe denkbar. Je nach Zugehörigkeit zum Grund- oder Leistungskurs können die Lernenden dann die entsprechenden Aufgaben lösen.

Als Kontext für die Nutzung der Materialien eignet sich einerseits die historische Entwicklung der Teilchendetektion. Dabei kann die Blaskammer als visueller Detektor vorgestellt werden. Anschließend ist dann eine Unterrichtsstunde zu modernen Detektoren denkbar, wobei dann auf Unterschiede und Vorteile gegenüber der Blaskammer einzugehen ist. Ein anderer Anknüpfungspunkt ergibt sich durch die Relevanz der Impuls-Reichweite-Beziehung in der Medizin. Die Impuls-Reichweite-Beziehung wird in den Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau angewendet und für die Impulsberechnung genutzt. In der *Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blaskammeraufnahmen* wird auch in einem Exkurs auf die medizinische Anwendung eingegangen. Eine Verknüpfung zur Medizin eignet sich also auch als

---

<sup>1</sup>Im sächsischen Lehrplan gibt es beispielsweise den Lernbereich 1 „Erhaltungssätze und ihre Anwendungen“ (Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport 2011, S. 44).

<sup>2</sup>Der Lernbereich 9 „Geladene Teilchen in Feldern“ bietet beispielsweise im sächsischen Lehrplan eine Gelegenheit die Materialien einzusetzen (ebd., S. 49).

motivierender Einstieg für die Materialien<sup>3</sup>.

## 4.4 Aufbau und Einsatz der Materialien

Bei den Materialien kann zwischen Einführungsmaterialien, Arbeitsblättern<sup>4</sup> und Zusatzmaterialien unterschieden werden. Einführungsmaterialien vermitteln Grundlagenwissen sowohl hinsichtlich der Bedienung der Software, als auch fachliche Kenntnisse. Durch die Bearbeitung der Arbeitsblätter lernen die Schülerinnen und Schüler die Auswertungsmethoden für Blasenkammeraufnahmen kennen. Die Zusatzmaterialien sind als Hilfestellung gedacht und bündeln Informationen, welche für die Auswertung benötigt werden.

Die Materialien bestehen jeweils aus digitalen und analogen Teilen. Der digitale Teil ist dabei jeweils ein GeoGebra-Applet, welches online über GeoGebra-Tube zur Verfügung gestellt wird und über einen Browser bedient werden kann. Im Falle der Arbeitsblätter sind in die Applets die Blasenkammeraufnahmen, welche bearbeitet werden, eingefügt. Der Maßstab ist dabei so gewählt, dass eine Einheit in GeoGebra 1 cm im Original entspricht. Im rechten Teil der Geometrie-Ansicht werden Texte und Aufgabenstellungen, sowie Eingabefelder angezeigt. Durch die Betätigung der Buttons gelangen die Lernenden zur nächsten bzw. vorhergehenden Aufgabe, bestätigen sie Eingaben oder veranlassen sie die Anzeige von Tipps.

The screenshot displays the GeoGebra applet interface. On the left, a 3D coordinate system shows a curve with points labeled 'Anfang' (red), 'Ende' (blue), and 'SP' (green). The coordinates for 'Anfang' are (-16.48, 155.63), for 'Ende' are (-5, 155), and for 'SP' are (4.93, 157.85). The main area shows a 2D plot of the curve with a green line segment. A task panel on the right contains the following text:

**1. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Krümmung der Spur**

Schritt 1: Bestimmung der z-Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur  
 Zeige View 1 an und verschiebe dieses Bild auf die Blasenkammeraufnahme (View 2), sodass zwei Vorderseitenkreuze übereinander liegen.  
 Miss die Abstände

- $d_B$  zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,
- $d_A$  zwischen den beiden Anfangspunkten,
- $d_E$  zwischen den beiden Endpunkten.

Berechne aus den Werten die z-Koordinaten des Anfangs- und des Endpunktes.

Buttons: Tipp 1, Tipp 2

View 1 anzeigen

ZAnfang= 0 cm  
 ZEnde= 0 cm

Buttons: Zurück, Weiter

Vorderseitenkreuze sind symmetrisch:

Rückseitenkreuze haben eine verlängerte Diagonale von links unten nach rechts oben:

**Abbildung 4.1:** Tipps in den GeoGebra-Applets: Durch Betätigen der Tipp-Buttons wird ein entsprechender Hinweis auf hellblauem Hintergrund im unteren Teil des GeoGebra-Applets angezeigt. Bei diesem Arbeitsblatt werden auch die 3D-Ansicht und das Algebrafenster benötigt.

<sup>3</sup>Für weitere Anregungen siehe Schmidt 2015, S. 54ff.

<sup>4</sup>Die im folgenden verwendete Abkürzung „AB“ steht für Arbeitsblatt.

Entsprechend der Eingaben erfolgt die Ausgabe eines Feedbacks, sodass die Lernenden wissen, ob die Antwort korrekt ist und ob sie weiterarbeiten können. Je nachdem, ob es für die Bearbeitung des Arbeitsblattes notwendig ist, werden auch das Algebrafenster und die 3D-Ansicht eingeblendet.

**2. Aufgabe - Aufstellen von Umwandlungshypothesen**

Stelle Hypothesen darüber auf, welche Teilchen bei dem markierten Neutronenstern die Spuren hinterlassen haben.  
Bestätige die Eingabe mit dem blauen Button!

Proton  
 positives Pion  
 negatives Pion  
 positives Kaon  
 negatives Kaon

Zurück Eingabe

**2. Aufgabe - Aufstellen von Umwandlungshypothesen**

Stelle Hypothesen darüber auf, welche Teilchen bei dem markierten Neutronenstern die Spuren hinterlassen haben.  
Bestätige die Eingabe mit dem blauen Button!

Proton Anzahl: 2  
 positives Pion  
 negatives Pion Anzahl: 1  
 positives Kaon  
 negatives Kaon

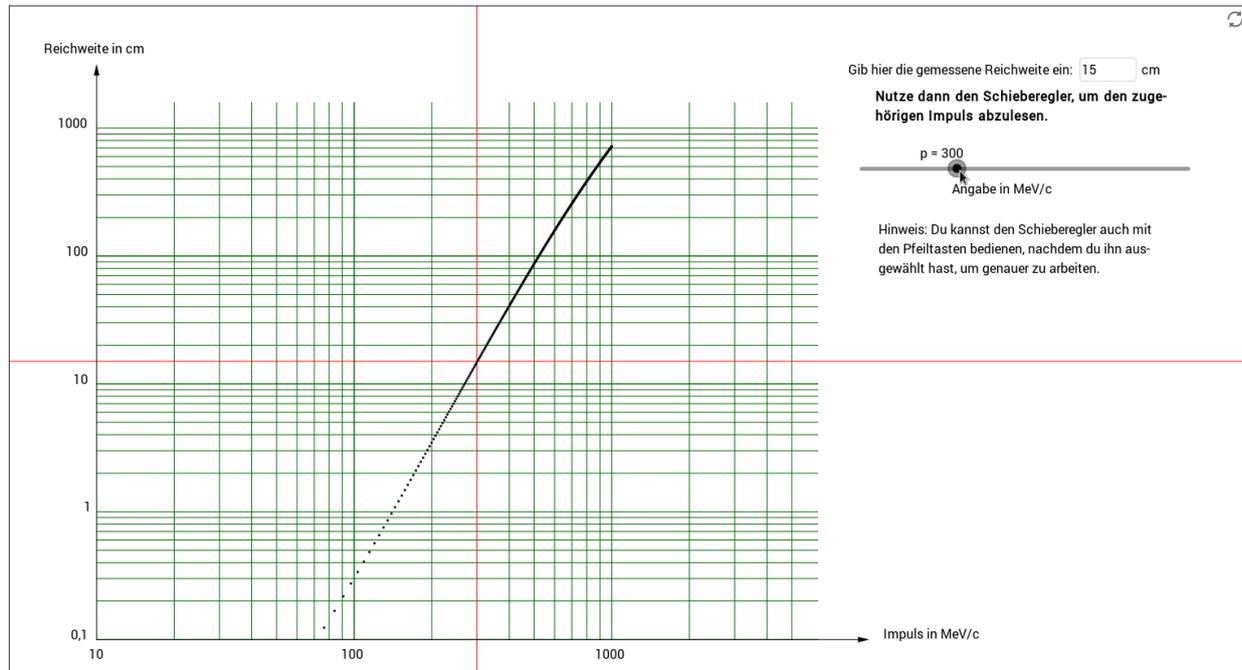
Zurück Weiter

Deine Eingabe ist korrekt.

**Abbildung 4.2:** Eingaben und Feedback in den GeoGebra-Applets: Nach der Eingabe der korrekten Antwort erscheint ein entsprechendes Feedback. Im rechten Teil der Geometrie-Ansicht werden Texte und Eingabefelder angezeigt. Links daneben wird die Blasenkammeraufnahme bzw. wie hier ein Ausschnitt aus einer Aufnahme präsentiert.

Zur Bestimmung des Impulses eines Teilchens aus seiner Reichweite wird die Impuls-Reichweite-Beziehung ausgenutzt. In den Materialien wird der Graph der Impuls-Reichweite-Beziehung in Form eines GeoGebra-Applets bereitgestellt.

#### Impuls-Reichweite-Beziehung Proton

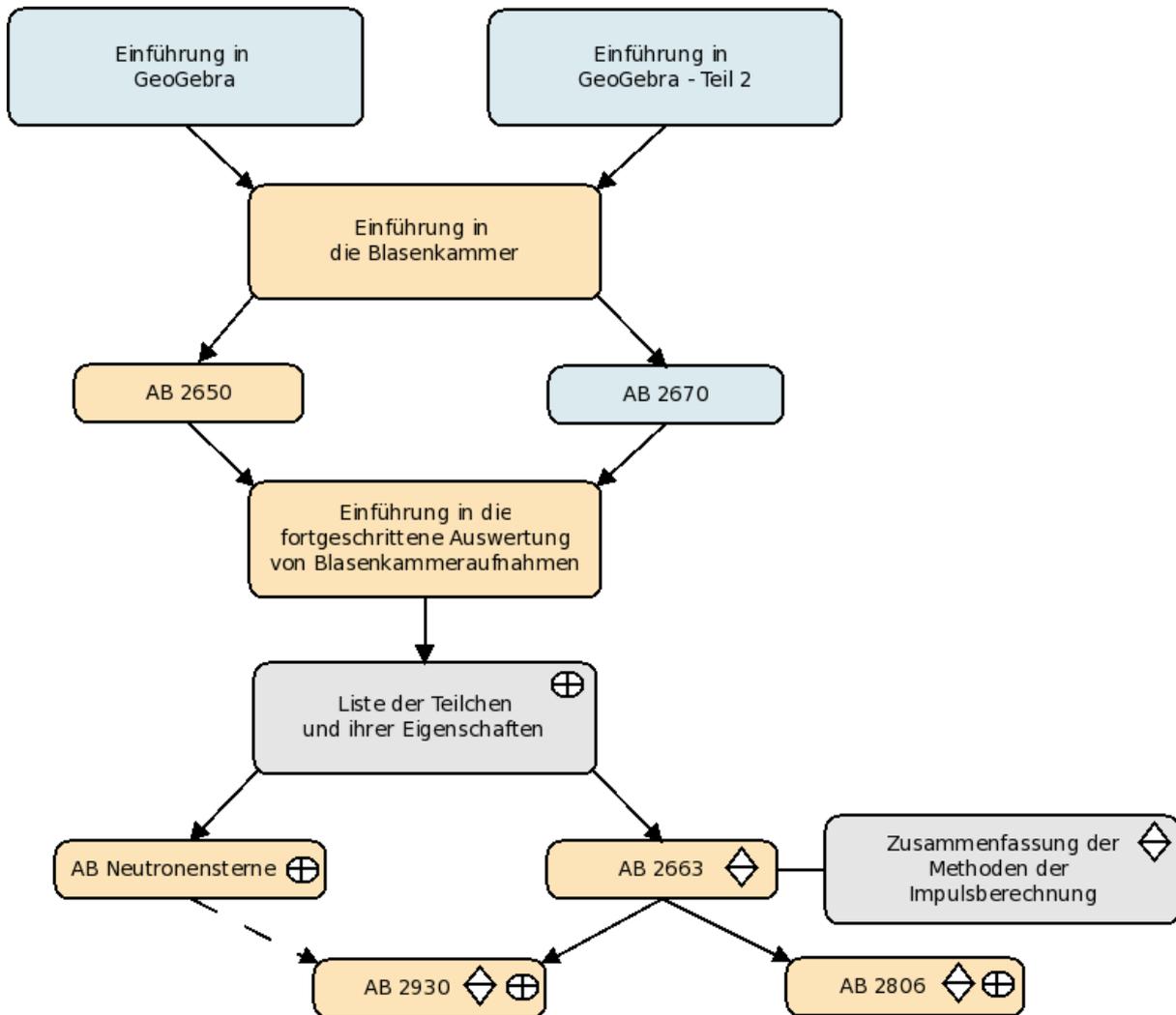


**Abbildung 4.3:** GeoGebra-Applet zur Impuls-Reichweite-Beziehung: Durch Eingabe der gemessenen Reichweite wird die waagerechte Markierungslinie eingestellt. Anschließend kann mithilfe des Schiebereglers die Position der senkrechten Markierungslinie verändert und so der zugehörige Impuls abgelesen werden.

Abbildung 4.4 soll verdeutlichen, welche zeitliche Abfolge für die Materialien empfohlen wird. Ein Pfeil symbolisiert dabei, dass ein Material zeitlich vor dem anderen Material bearbeitet werden sollte. Stehen zwei Materialien nebeneinander, so können diese parallel zur Bearbeitung angeboten werden (beispielsweise in einer Stationsarbeit). Der gestrichelte Pfeil soll zeigen, dass es hilfreich ist das AB Neutronensterne vor dem AB 2930 zu bearbeiten, aber nicht unbedingt notwendig. Das AB Neutronensterne könnte damit auch parallel zum AB 2930 und AB 2806 genutzt werden.

Materialien, welche blau hinterlegt sind, können optional eingesetzt werden. Besitzt eine Klasse beispielsweise schon viel Erfahrung im Umgang mit GeoGebra, so ist es eventuell nicht notwendig die Einführungen zur Bedienung der Software zu bearbeiten. Die Technik-Hilfsblätter (Anhang A) sollten zur Unterstützung dennoch zur Verfügung gestellt werden. Die rot hinterlegten Materialien werden für den Einsatz innerhalb eines Unterrichtsabschnitts zur Blaskammer auf erhöhtem Anforderungsniveau empfohlen. Bei den grau hinterlegten Materialien handelt es sich um Zusatzmaterialien, welche als Hilfestellung für die entsprechend gekennzeichneten Arbeitsblätter genutzt werden können. Die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* muss von den Lernenden ausgefüllt werden. Die Zusammensetzung aus Quarks der Hadronen und

die Massen der Teilchen sollen dabei mithilfe des Internets recherchiert werden. Alternativ besteht die Möglichkeit das „Particle Physics Booklet“ der Particle Data Group zu verwenden. Die *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* kann anhand des AB 2663 nachvollzogen und als Hilfestellung für die nachfolgenden Arbeitsblätter verwendet werden.



**Abbildung 4.4:** Ablaufplan für den Einsatz der Materialien: Das Flussdiagramm zeigt die empfohlene zeitliche Abfolge der Materialien beim Einsatz im Unterricht.

An verschiedenen Punkten innerhalb dieses Ablaufs ergeben sich Möglichkeiten und unter Umständen auch die Notwendigkeit für Diskussionen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die weiterführenden Fragen auf den analogen Arbeitsblättern mehrere Lösungen zulassen bzw. den Transfer von Wissen erfordern. Empfehlenswert ist aus diesem Grund, dass die Arbeitsblätter auf erhöhtem Anforderungsniveau (AB 2663, AB Neutronensterne, AB 2930 und AB 2806) entsprechend nachbereitet werden. Die Diskussionsfragen können dabei sowohl in Partner-, Gruppen- oder Frontalarbeit erörtert werden. Es bietet sich beispielsweise an, zunächst in Partnerarbeit einen Austausch zu ermöglichen und dies im Anschluss auf das Plenum

zu erweitern. Geeignet erscheint eine solche Nachbereitung in zwei Phasen:

- Bearbeitung von AB Neutronensterne und AB 2663 mit anschließender Nachbereitung,
- Bearbeitung von AB 2930 und AB 2806 mit anschließender Nachbereitung.

Dann wird sichergestellt, dass eventuelle Unklarheiten oder Probleme, welche bei der Bearbeitung der ersten beiden Arbeitsblätter aufgetreten sind, ausgeräumt werden konnten, da diese die Voraussetzung für die anderen beiden Arbeitsblätter bilden. Außerdem kann ein abschließendes Fazit erfolgen. Diskussionsanreize bieten die folgenden Punkte:

AB Neutronensterne	AB 2663
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Hypothesen sind für die einzelnen Fragestellungen zulässig? Gibt es mehrere zulässige Hypothesen zu einem Neutronenstern?</li> <li>• Wie muss mit solchen Mehrdeutigkeiten umgegangen werden? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Arbeit der Forscher?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Probleme ergeben sich für die Methoden zur Impulsberechnung jeweils?</li> <li>• Welche Kriterien für die Anwendbarkeit der jeweiligen Methode folgen daraus?</li> <li>• Ist die Bestimmung des Impulses von jeder Spur möglich? Gibt es Grenzen bei der Auswertung von Blaskammeraufnahmen?</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Rolle spielen theoretische Vorüberlegungen bei der Auswertung von Blaskammeraufnahmen und auch bereits bei der Planung von Experimenten?</li> </ul>	
AB 2930	AB 2806
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warum ist hier nur eine der beiden Methoden der Impulsberechnung anwendbar?</li> <li>• Welchen Zweck erfüllt in diesem Fall die Aufstellung der Umwandlungshypothesen?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Bedeutung besitzt die Auswertung der Blaskammeraufnahme im Fall dieses Arbeitsblattes? Wie lässt sich hier das Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment charakterisieren?</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welcher grundlegende Weg wird bei der Auswertung immer wieder beschritten?</li> <li>• Welche Konsequenzen ergeben sich, falls ein Spurmuster mit keiner Methode sinnvoll ausgewertet werden kann?</li> <li>• Es wurden sehr viele Blaskammeraufnahmen am CERN erstellt, welche einzeln ausgewertet werden mussten. Was bedeutete dies für die Arbeit der Forscher? Welche Rolle spielen dabei Kooperation und Kommunikation?</li> </ul>	

## Überblick über die Materialien

---

### Einführung in GeoGebra<sup>5</sup>

Link: <http://tube.geogebra.org/student/mCmLLS8Ls> (vgl. Schmidt 2015, S. 69)

Technik-Hilfsblatt: ebd., S. 105ff.

Inhalte (vgl. ebd., S. 66):

- Grundlagen von GeoGebra (Werkzeugleiste, Eingabezeile, Algebrafenster)
  - Erstellen von Kreisen und Bestimmen des Radius
  - Erstellen von Tangenten und Arbeiten mit den Vektoren
  - Erstellen von Streckenzügen<sup>6</sup>
- 

### Einführung in GeoGebra - Teil 2

Link: <http://tube.geogebra.org/m/s3yscf00>

Technik-Hilfsblatt 2: Anhang A

Inhalte:

- Ausblenden von Objekten
  - Erstellen der Mittelsenkrechten einer Strecke und des Mittelpunktes eines Kreises
  - Arbeit mit der 3D-Ansicht
  - Messen von Abständen
  - Messen von Bogenlängen
- 

<sup>5</sup>Dieses Material wurde von Rebecca Schmidt im Rahmen der Masterarbeit „Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau“ erstellt.

<sup>6</sup>Streckenzüge werden für die Bearbeitung der Materialien auf erhöhtem Anforderungsniveau nicht benötigt.

## Einführung in die Blaskammer<sup>7</sup>

Link: <http://tube.geogebra.org/student/mJX8UIu8a> (vgl. ebd., S. 69)

PDF-Version: ebd., S. 85ff.

Bemerkung: Die Bearbeitung der analogen Arbeitsblätter „Aufbau der Blaskammer“ (ebd., S. 110) und „Arbeitsblatt zur Teilchenidentifikation“ (ebd., S. 111ff.) kann optional parallel erfolgen.

Inhalte (vgl. ebd., S. 60f.):

- Aufbau, Funktionsweise und Einsatz von Blaskammern
- Erzeugung von Spuren und Sichtbarkeit dieser in der Blaskammer
- Identifikation von Teilchen und Prozessen auf Blaskammeraufnahmen

---

## AB 2650<sup>7</sup>

Link: <http://tube.geogebra.org/student/mDkYj1YUi> (vgl. ebd., S. 69)

Analoges Arbeitsblatt: ebd., S. 117ff. (Lösungsblatt: ebd., S. 142ff.)

Inhalte (vgl. ebd., S. 66):

- Zusammenhang zwischen elektrischem Ladungsvorzeichen und Krümmungsrichtung einer Spur
- Identifikation von Teilchen und Wechselwirkungen anhand der Spurmuster
- Vergleich der Geschwindigkeiten zweier gleicher Teilchen anhand der Krümmung einer Spur (qualitativ)

---

<sup>7</sup>Dieses Material wurde von Rebecca Schmidt im Rahmen der Masterarbeit „Einsatz von Blaskammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau“ erstellt.

**AB 2670<sup>8</sup>**

Link: <http://tube.geogebra.org/student/mV1MsKdPp> (vgl. Schmidt 2015, S. 69)

Analoges Arbeitsblatt: ebd., S. 119ff.

Bemerkung: Die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist auch ausschließlich analog möglich.

Inhalte (vgl. ebd., S. 67):

- Zusammenhang zwischen elektrischem Ladungsvorzeichen und Krümmungsrichtung einer Spur
  - Vergleich der Geschwindigkeiten zweier gleicher Teilchen anhand der Krümmung einer Spur (qualitativ)
  - Zusammenhang zwischen Impuls eines Teilchens und Krümmung der Spur (qualitativ)
- 

**Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blasenkammeraufnahmen**

Link: <http://tube.geogebra.org/m/acnTesUy>

PDF-Version: Anhang B

Inhalte:

- Räumliche Rekonstruktion von Ereignissen auf Blasenkammeraufnahmen
  - Zusammengesetzte Teilchen - Hadronen
  - Elastische und inelastische Wechselwirkungen
  - Erhaltungssätze bei Umwandlungsprozessen
  - Strangeness als Eigenschaft von Hadronen und Erhaltung der Strangeness
  - Möglichkeiten der Impulsberechnung anhand von Spuren auf Blasenkammeraufnahmen (Formel für Impulsberechnung aus der Krümmung einer Spur und Nutzung der Impuls-Reichweite-Beziehung)
- 

<sup>8</sup>Dieses Material wurde von Rebecca Schmidt im Rahmen der Masterarbeit „Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau“ erstellt.

## AB Neutronensterne

Link: <http://tube.geogebra.org/m/VcICi3Ui>

Analoges Arbeitsblatt: Anhang C

Zusatzmaterial: *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* (Anhang G.1)

Bemerkung: Das Zusatzmaterial ist hilfreich für die Lösung der Aufgaben. Die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* muss im Vorfeld ausgefüllt werden.

Inhalte:

- Untersuchung der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs
  - Charakteristika des Spurmusters, welches dabei entsteht
  - Erhaltung der elektrischen Ladung, der schwachen Ladung und der Strangeness
- 

## AB 2663

Link: <http://tube.geogebra.org/m/vjI67Sf6>

Analoges Arbeitsblatt: Anhang D

Zusatzmaterial: *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* (Anhang G.2)

Bemerkung: Das Zusatzmaterial dient dem Überblick über die einzelnen Schritte, welche bei der Impulsberechnung durchgeführt werden müssen. Die Lernenden können es bei der Bearbeitung dieses Arbeitsblattes neben sich legen und verfolgen. Sie können sich bei Bedarf auch Anmerkungen machen, da dieses Zusatzmaterial bei der Bearbeitung der folgenden Arbeitsblätter genutzt werden kann.

Inhalte:

- Impulsberechnung aus der Krümmung einer Spur
  - Impulsberechnung aus der Reichweite eines Teilchens
  - Vergleich der beiden Methoden
  - Kriterien für die Anwendbarkeit der jeweiligen Methode
-

**AB 2806**

Link: <http://tube.geogebra.org/m/SbVHkFAX>

Analoges Arbeitsblatt: Anhang E

Zusatzmaterial: *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* (Anhang G.2), *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* (Anhang G.1)

Bemerkung: Die Zusatzmaterialien helfen bei der Bearbeitung der Aufgaben. Die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* muss im Vorfeld ausgefüllt werden.

Inhalte:

- Untersuchung der Umwandlung eines positiven Pions in ein Anti-Myon und anschließend in ein Positron (jeweils mit zugehörigen Neutrinos)
  - Berechnung des Impulses des Myon-Neutrinos im Fall, dass das Pion ruht, mithilfe des Energieerhaltungssatzes (relativistisch)
  - Auswahl und Durchführung einer geeigneten Methode der Impulsberechnung anhand der Spuren auf der Blasenkammeraufnahme
  - Ziehen von Schlussfolgerungen mit Hilfe des Impulserhaltungssatzes
- 

**AB 2930**

Link: <http://tube.geogebra.org/m/oqgCRSEJ>

Analoges Arbeitsblatt: Anhang F

Zusatzmaterial: *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* (Anhang G.2), *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* (Anhang G.1)

Bemerkung: Die Zusatzmaterialien helfen bei der Bearbeitung der Aufgaben. Die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* muss im Vorfeld ausgefüllt werden.

Inhalte:

- Untersuchung einer inelastischen Wechselwirkung eines Protons des Teilchenstrahls mit einem Proton des Wasserstoffs
  - Auswahl und Durchführung einer geeigneten Methode der Impulsberechnung anhand der Spuren auf der Blasenkammeraufnahme
  - Anwendung des Impuls- und Energieerhaltungssatzes zur Prüfung der aufgestellten Hypothesen und damit Rückschluss auf das neutrale Teilchen
-

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Unterrichtsmaterialien zum Thema Blasenkammer bieten die Möglichkeit die Konzepte der Teilchenphysik zum Unterrichtsgegenstand zu machen. Die entstandenen Materialien zu diesem Thema auf erhöhtem Anforderungsniveau können für die Gestaltung einer Unterrichtssequenz im Leistungskurs der Oberstufe genutzt werden. Sie greifen bekannte physikalische Grundkonzepte auf, ermöglichen das Lernen von Zusammenhängen im Bereich der Teilchenphysik und das Nachdenken über physikalische Erkenntnisgewinnung. Die Unterrichtsmaterialien bauen auf den im Rahmen einer weiteren Masterarbeit von Rebecca Schmidt entstandenen Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau auf. Die Bearbeitung einiger dieser Unterrichtsmaterialien bildet die Voraussetzung für das Lösen der Aufgaben auf erhöhtem Anforderungsniveau.

Neben Einführungsmaterialien zu den benötigten Funktionen der verwendeten Mathematiksoftware GeoGebra und den Grundlagen der fortgeschrittenen Auswertung von Blasenkammeraufnahmen wurden Arbeitsblätter erstellt. Sie thematisieren die Methoden der Impulsberechnung von Teilchen anhand der Spuren auf Blasenkammeraufnahmen, die Untersuchung einer inelastischen Proton-Proton-Wechselwirkung mit Rückschluss auf das entstandene elektrisch neutrale Teilchen, das Aufstellen von Umwandlungshypothesen für die Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton und die Untersuchung der Umwandlung eines positiven Pions. Anhand dieser Beispiele werden die Erhaltung der Energie, des Impulses, der elektrischen und der schwachen Ladung bei Teilchenwechselwirkungen vertieft. Außerdem werden Kenntnisse zur Bewegung elektrisch geladener Teilchen im magnetischen Feld angewandt.

Die Materialien decken damit die Möglichkeiten, welche sich bei der Auswertung der Blasenkammeraufnahmen ergeben, nicht vollständig ab. Denkbar wäre beispielsweise die Erweiterung der Materialien hinsichtlich der Untersuchung sogenannter  $V_0$ -Spurmuster, welche bei der Umwandlung seltsamer Teilchen über die schwache Wechselwirkung entstehen. Eine solche Aufgabe war ursprünglich geplant, konnte allerdings aufgrund der begrenzten Zeit der Masterarbeit nicht umgesetzt werden.

Das Ziel dieser Masterarbeit und auch der Masterarbeit zu den Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau bestand in der Erstellung der Materialien. Die praktische Erprobung der Materialien im Unterricht steht damit noch aus. Erfahrungen, welche dabei gesammelt werden, können sicherlich zur Optimierung und Behebung von Problemen, welche sich beim Einsatz im Unterricht ergeben, genutzt werden. Da die Bereitstellung der Materialien über das Physik-

portal “LEIFIphysik“ geplant ist, werden sie Lehrenden und Lernenden in ganz Deutschland zugänglich gemacht. Dadurch ergeben sich vielfältige Erprobungs- und Einsatzmöglichkeiten.

# 6 Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektrische Ladungszahlen der Elementarteilchen . . . . .	5
2.2	Schwache Ladungszahlen der Elementarteilchen . . . . .	6
2.3	Farbladungsvektoren und Anti-Farbladungsvektoren im ebenen Farbgitter . . . . .	7
2.4	Gitterpunkte der Quarks im Farbgitter . . . . .	8
2.5	Ordnungsschema der Materieteilchen . . . . .	9
2.6	Gitterpunkte der Gluonen im Farbgitter . . . . .	11
2.7	Zwei Nukleonen mit Quarkpaarbindung . . . . .	12
2.8	Die 2 m große Blasenkammer am CERN . . . . .	16
2.9	Aufbau der Blasenkammer . . . . .	17
2.10	Bezugsmarken der 2 m großen Blasenkammer . . . . .	18
2.11	Stereo-Shift-Methode . . . . .	20
2.12	Sagitta-Methode 3D . . . . .	22
2.13	Krümmungsrichtung der Spuren . . . . .	23
2.14	Impuls-Reichweite-Beziehung . . . . .	27
2.15	Deponierte Energie-Dosis in Abhängigkeit von der Eindringtiefe . . . . .	29
2.16	Ausschnitte aus der Blasenkammeraufnahme 2663 . . . . .	31
2.17	Ausschnitt aus der Blasenkammeraufnahme 2930 . . . . .	33
2.18	Ausschnitt aus der Blasenkammeraufnahme 2806 . . . . .	34
3.1	Klassifikation von Medien . . . . .	38
3.2	Darstellung des Impulses . . . . .	39
3.3	Weiterführende Frage auf dem analogen Arbeitsblatt . . . . .	41
3.4	Farbige Hervorhebung der Spuren . . . . .	42
3.5	Kompetenzmatrix der Bildungsstandards . . . . .	45
4.1	Tipps in den GeoGebra-Applets . . . . .	55
4.2	Eingaben und Feedback in den GeoGebra-Applets . . . . .	56
4.3	GeoGebra-Applet zur Impuls-Reichweite-Beziehung . . . . .	57
4.4	Ablaufplan für den Einsatz der Materialien . . . . .	58



# 7 Literatur

- Bleck-Neuhaus, Jörn: *Elementare Teilchen. Moderne Physik von den Atomen bis zum Standard-Modell*. Berlin, Heidelberg, 2010.
- Deci, Edward L.; Ryan, Richard M.: „Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik“. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 39/2 (1993), S. 223–238.
- Girwidz, Raimund: „Lerntheoretische Konzepte für Multimediaanwendungen zur Physik“. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/3 (2004), S. 9–19.
- „Medien im Physikunterricht“. In: *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Hrsg. von Raimund Girwidz; Ernst Kircher; Peter Häußler. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 203–264.
  - „Neue Medien und Multimedia“. In: *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Hrsg. von Raimund Girwidz; Ernst Kircher; Peter Häußler. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 423–450.
- Glaser, Donald A.: „Invention of the Bubble Chamber and Subsequent Events“. In: *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 1993*. Hrsg. von Gerd G. Harigel; Derek C. Colley; Donald C. Cundy. Amsterdam: North-Holland, 1994, S. 3–18.
- Griffiths, David J.: *Einführung in die Elementarteilchenphysik*. Berlin: Akademie-Verlag, 1996.
- Helzel, Christian: *Erstellung eines computergestützten Versuchs des physikalischen Fortgeschrittenenpraktikums zur Auswertung von Blasenkammeraufnahmen*. Bonn, 2002.
- Hopf, Martin; Wiesner, Hartmut; Schecker, Horst: *Physikdidaktik kompakt*. Freising: Aulis, 2011.
- Kircher, Ernst: „Über die Natur der Naturwissenschaften lernen“. In: *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Hrsg. von Raimund Girwidz; Ernst Kircher; Peter Häußler. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009, S. 763–798.
- Kleinknecht, Konrad: *Detektoren für Teilchenstrahlung*. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden: Teubner, 2005.
- Kraft, Gerhardt: „Schwere Geschütze gegen Krebs. Der Weg der Schwerionentherapie von den physikalischen Einsichten zur klinischen Anwendung“. In: *Physik Journal* 2 (2006), S. 29–35.
- Kultusministerkonferenz: *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik*. 2004.

- Leisen, Josef: „Aufgabenkultur im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht“. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht/MNU* 59/5 (2006), S. 260–266.
- Mikelskis-Seifert, Silke; Duit, Reinders: „Naturwissenschaftliches Arbeiten“. In: *PIKO-Briefe* 6 (2010).
- Mulvey, John H.: „Legacies of the Bubble Chamber“. In: *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 1993*. Hrsg. von Gerd G. Harigel; Derek C. Colley; Donald C. Cundy. Amsterdam: North-Holland, 1994, S. 427–444.
- Netzwerk Teilchenwelt: *Schulmaterialien zur Teilchenphysik: Wechselwirkungen und Teilchen*. Hrsg. von Joachm Herz Stiftung. In Vorbereitung. JHS Verlag, 2015.
- Particle Data Group: *Particle Physics Booklet*. 2012.
- Peyrou, Charles: „European Bubble Chambers“. In: *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 1993*. Hrsg. von Gerd G. Harigel; Derek C. Colley; Donald C. Cundy. Amsterdam: North-Holland, 1994, S. 59–77.
- Physikalische Blätter: „Luis Alvarez: Nobelpreisträger für Physik 1968“. In: *Physik Journal* 25/4 (1969), S. 175–177. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/phb1.19690250406>.
- Povh, Bogdan u. a.: *Teilchen und Kerne : Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- Rabe, Thorid: „Affektive Aspekte und Lernen von Physik“. In: *PIKO-Briefe* 2 (2010).
- Rubbia, Carlo: „Welcome Address at the Conference on the Bubble Chamber and its Contributions to Particle Physics“. In: *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 1993*. Hrsg. von Gerd G. Harigel; Derek C. Colley; Donald C. Cundy. Amsterdam: North-Holland, 1994, S. XVII–XX.
- Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport: *Lehrplan Gymnasium - Physik*. 2011.
- Schmidt, Rebecca: *Einsatz von Blasenkammerbildern in der Schule auf grundlegendem Anforderungsniveau*. Dresden, 2015.
- Seul, Gerhild: *Properties of elementary particles*. 2009.

# Anhang

<b>A</b>	<b>Technik-Hilfsblatt 2</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blasenkammeraufnahmen</b>	<b>79</b>
	B.1 Didaktische Hinweise . . . . .	79
	B.2 PDF-Version der Einführung . . . . .	81
<b>C</b>	<b>AB Neutronensterne</b>	<b>95</b>
	C.1 Didaktische Hinweise . . . . .	95
	C.2 Arbeitsblatt . . . . .	96
	C.3 Lösungsblatt . . . . .	100
<b>D</b>	<b>AB 2663</b>	<b>105</b>
	D.1 Didaktische Hinweise . . . . .	105
	D.2 Arbeitsblatt . . . . .	107
	D.3 Lösungsblatt . . . . .	111
<b>E</b>	<b>AB 2806</b>	<b>115</b>
	E.1 Didaktische Hinweise . . . . .	115
	E.2 Arbeitsblatt . . . . .	116
	E.3 Lösungsblatt . . . . .	119
<b>F</b>	<b>AB 2930</b>	<b>123</b>
	F.1 Didaktische Hinweise . . . . .	123
	F.2 Arbeitsblatt . . . . .	124
	F.3 Lösungsblatt . . . . .	127
<b>G</b>	<b>Zusatzmaterialien</b>	<b>131</b>
	G.1 Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften . . . . .	131
	G.2 Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung . . . . .	135
	<b>Erklärung</b>	<b>137</b>



# A Technik-Hilfsblatt 2

Link zur digitalen Version: <http://tube.geogebra.org/m/s3yscf00>

---

## Technik-Hilfsblatt 2

Dieses Hilfsblatt erläutert die Werkzeuge und Methoden in GeoGebra, welche zum Bearbeiten der Materialien zu den Blasenkammeraufnahmen auf erhöhtem Anforderungsniveau benötigt werden. Es stellt eine Erweiterung des Technik-Hilfsblatt aus den Materialien auf grundlegendem Anforderungsniveau dar. Aus diesem werden insbesondere die Grundlagen der Kapitel

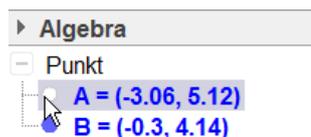
- Allgemeine Hinweise
- Kreis durch drei Punkte
- Radius
- Tangenten
- Vektoraddition

benötigt.

### Inhaltsverzeichnis

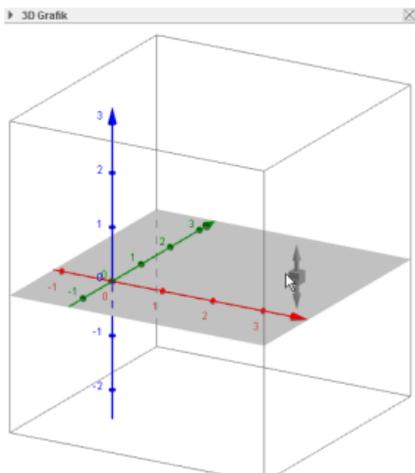
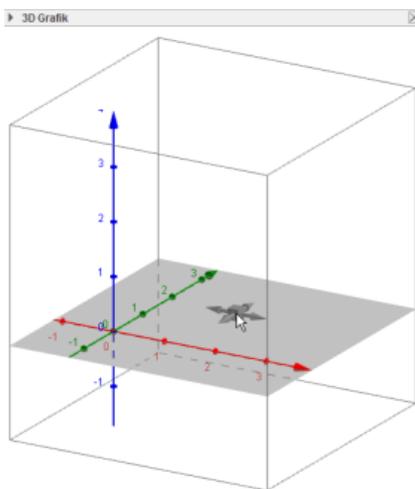
1 Ausblenden von Objekten	1
2 3D-Ansicht	2
3 Erstellen von Punkten	3
4 Messen von Abständen	3
5 Messen von Bogenlängen	4
6 Mittelpunkt	5
7 Mittelsenkrechte	5

### 1 Ausblenden von Objekten



- Objekte können ausgeblendet werden, indem auf den Punkt vor dem Objekt im Algebrafenster geklickt wird

## 2 3D-Ansicht



- Navigieren mithilfe der Werkzeuge der letzten Werkzeugkategorie

- Drehen für Ansicht aus anderer Perspektive
- Verschieben der 3D-Ansicht
- Vergrößern und Verkleinern

- Achsen der 3D-Ansicht:

- rot:  $x$ -Achse
- grün:  $y$ -Achse
- blau:  $z$ -Achse

- Graphik-Ansicht zeigt  $x$ - $y$ -Ebene des Koordinatensystems, d.h. alle Objekte in der Graphik-Ansicht werden auch in der  $x$ - $y$ -Ebene der 3D-Ansicht angezeigt

- Beim Verschieben der 3D-Ansicht durch Klicken zwischen einer Bewegung in  $x$ - $y$ -Richtung und einer Bewegung in  $z$ -Richtung wechseln

- Beim Bewegen von Objekten (Maus-Werkzeug) ebenfalls durch Klicken zwischen Bewegung in  $x$ - $y$ -Richtung und  $z$ -Richtung umschalten

### 3 Erstellen von Punkten

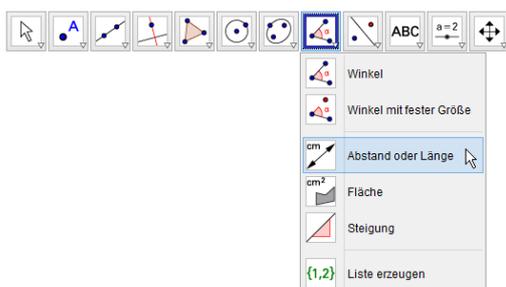
Eingabe: **A=(1,1,1)**

Eingabe: **B=(x(A), y(A), 10)**

- Eingabe des Befehls „A=( , , )“ erzeugt den Punkt A mit den in den runden Klammern angegebenen Koordinaten
- Name des Punktes kann beliebiger Großbuchstabe (bzw. mehrere Buchstaben) sein
- Befehle „x( )“, „y( )“ und „z( )“ zum Übernehmen der Koordinaten anderer Punkte, welche in den runden Klammern angegeben werden

### 4 Messen von Abständen

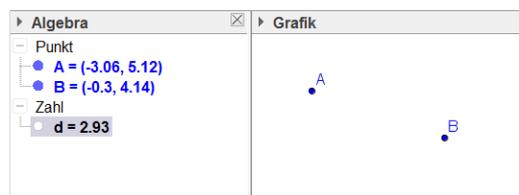
#### Möglichkeit 1



- „Abstand oder Länge“ auswählen (im 8. Werkzeug von links)
- Zwei Punkte auswählen
- Der Abstand wird in der Kategorie „Zahl“ im Algebrafenster und direkt als Beschriftung in der Grafik angezeigt

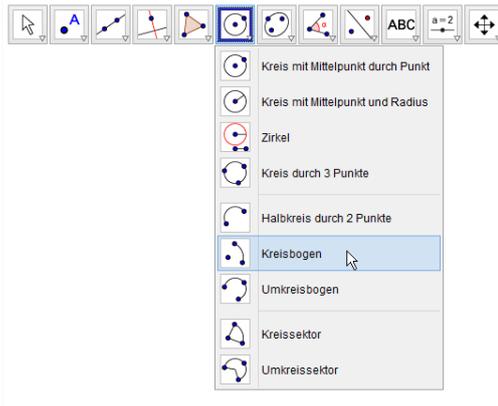
#### Möglichkeit 2

Eingabe: **d=Abstand[A, B]**



- Eingabe des Befehl „Abstand [ , ]“ in die Eingabezeile erzeugt eine Zahl, welche dem Abstand der beiden in der eckigen Klammer angegebenen Punkte entspricht
- Vergabe einer Bezeichnung erleichtert das Auffinden im Algebrafenster, z.B. „d = Abstand[ , ]“
- Diese Möglichkeit eignet sich besonders für das Messen von Abständen in der 3D-Ansicht

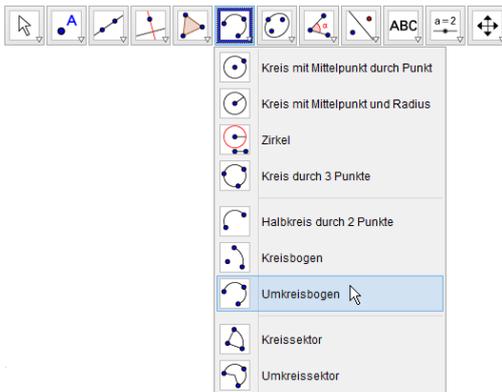
## 5 Messen von Bogenlängen



- Evtl. den Mittelpunkt des Kreises, zu welchem der Bogen gehört, erstellen (siehe Abschnitt „Mittelpunkt“)
- „Kreisbogen“ auswählen (im 6. Werkzeug von links)
- Mittelpunkt und die zwei Punkte, zwischen welchen der Bogen gemessen werden soll, auswählen (bei der Auswahl der beiden Punkte entgegen dem Uhrzeigersinn vorgehen)
- Der Kreisbogen wird in der Kategorie „Kegelschnitt“ im Algebrafenster angezeigt und die dort angegebene Zahl entspricht der Bogenlänge
- Vorgehen ist analog für einen Bogen in der 3D-Ansicht (Punkte können auch im Algebrafenster ausgewählt werden)

### Alternatives Vorgehen

(falls drei Punkte des Bogens bekannt sind und die Gesamtlänge gesucht ist)



- „Umkreisbogen“ auswählen (im 6. Werkzeug von links)
- Drei Punkte wählen
- Der Kreisbogen wird in der Kategorie „Kegelschnitt“ im Algebrafenster angezeigt und die dort angegebene Zahl entspricht der Bogenlänge
- Vorgehen ist analog für einen Bogen in der 3D-Ansicht (Punkte können auch im Algebrafenster ausgewählt werden)

## 6 Mittelpunkt

Eingabe: **M=Mittelpunkt[c]**

- Eingabe des Befehls „Mittelpunkt[ ]“ in die Eingabezeile erzeugt den Mittelpunkt des Objektes, welches in den eckigen Klammern angegeben wird
- Vergabe einer Bezeichnung erleichtert das Auffinden im Algebrafenster, z.B. „M = Mittelpunkt[ ]“
- Der Mittelpunkt wird unter der Kategorie „Punkt“ im Algebrafenster angezeigt

## 7 Mittelsenkrechte

- „Strecke“ auswählen (im 3. Werkzeug von links)
- Zwei Punkte auswählen (GeoGebra erzeugt eine Strecke durch die beiden Punkte)
- „Mittelsenkrechte“ auswählen (im 4. Werkzeug von links)
- Erstellte Strecke auswählen
- Die Mittelsenkrechte wird unter der Kategorie „Gerade“ im Algebrafenster angezeigt



# B Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blasenkammeraufnahmen

## B.1 Didaktische Hinweise

### Inhalte:

- Räumliche Rekonstruktion von Ereignissen auf Blasenkammeraufnahmen:
  - Bestimmung der  $z$ -Koordinate mittels Stereo-Shift-Methode
  - Bestimmung der  $z$ -Koordinate von Spurpunkten
  - Dreidimensionale Bestimmung des Krümmungsradius
- Zusammengesetzte Teilchen - Hadronen
- Elastische und inelastische Wechselwirkungen
- Erhaltungssätze bei Umwandlungsprozessen
- Strangeness als Eigenschaft von Hadronen und Erhaltung der Strangeness
- Zusammenhang zwischen der Masse eines Teilchens und Dicke der Spur
- Möglichkeiten der Impulsberechnung anhand von Spuren auf Blasenkammeraufnahmen:
  - Formel für Impulsberechnung aus der Krümmung einer Spur
  - Nutzung der Impuls-Reichweite-Beziehung

### Vorwissen:

- Kenntnis der Elementarteilchen (insbesondere der Quarks, des Elektrons und des Positrons)
- Kenntnis der elektrischen, schwachen und starken Ladung
- Kenntnis der Teilchen Proton und Neutron
- Aufbau und Funktionsprinzip der Blasenkammer<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen können die Lernenden in der *Einführung in die Blasenkammer* erwerben (vgl. Schmidt 2015, S. 60).

- Kenntnisse über die Bewegung elektrisch geladener Teilchen im Magnetfeld: Wirkung der Lorentzkraft als Radialkraft
- Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie (Äquivalenz von Masse und Ruheenergie, relativistischer Impuls, relativistische Energie-Impuls-Beziehung)
- Mathematische Grundlagenkenntnisse: Strahlensatz, Satz des Pythagoras, geometrische Begriffe (z.B. Mittelsenkrechte, Sehne)

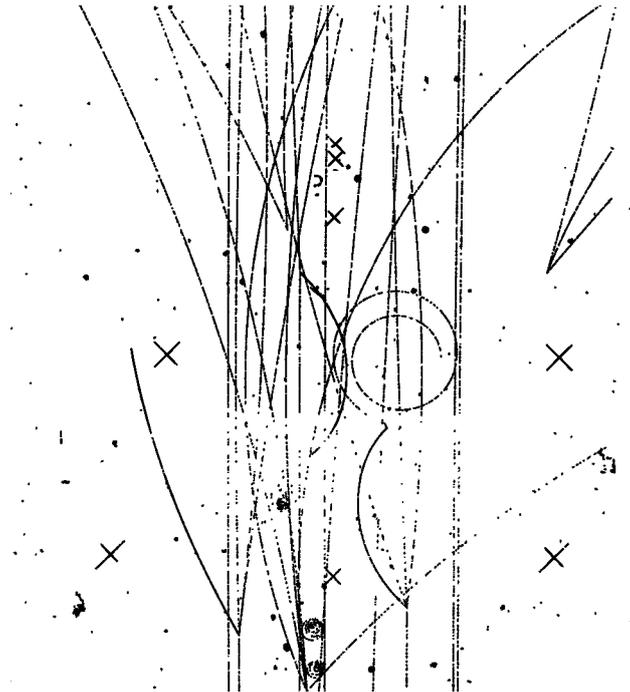
**Link zur digitalen Version:**

- <http://tube.geogebra.org/m/acnTesUy>

## B.2 PDF-Version der Einführung

---

### Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blasenkammeraufnahmen



Um Wechselwirkungen auf Blasenkammeraufnahmen zu untersuchen, ist es oft notwendig, den Impuls der Teilchen zu bestimmen, welche die Spuren hinterlassen haben. In dieser Einführung lernst du die dafür benötigten Grundlagen.

Bei den auf Blasenkammerbildern beobachteten Teilchen handelt es sich nicht nur um die dir bekannten Teilchen wie Protonen, Elektronen oder Positronen. Deshalb werden dir hier außerdem weitere Teilchen vorgestellt, deren Spuren du in den Aufgaben analysieren wirst.

Viel Spaß!

---

## Geometrische Rekonstruktionen mit Blasenkammeraufnahmen

Eine Blasenkammeraufnahme zeigt lediglich eine Projektion der Teilchenspuren, welche eigentlich im Raum verlaufen. Um die dreidimensionale Rekonstruktion der Teilchenspuren zu ermöglichen, werden zwei Aufnahmen (Views) des Inneren der Blasenkammer von Kameras an verschiedenen Positionen benötigt. View 2 zeigt die Projektion in x-y-Richtung.

Sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite der Blasenkammer befinden sich außerdem Markierungskreuze als Referenzpunkte.

Aufgrund der verschiedenen Aufnahmepositionen erscheinen die Abbilder der Markierungskreuze und auch der Teilchenspuren bezüglich der Views gegeneinander verschoben.



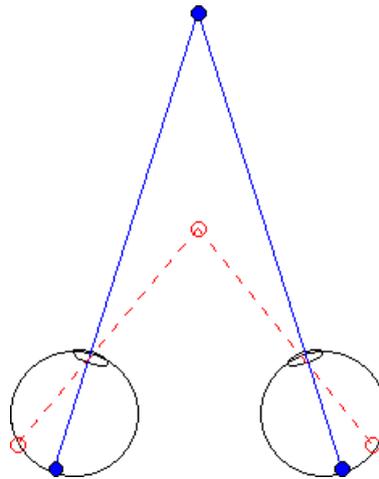
**Abbildung 1:** Markierungskreuze der 2 m großen Blasenkammer:

- Links - Vorderseitenkreuz (eingekerbt in die Innenseite der den Kameras zugewandten Glasplatte)
- Mitte - eingekerbt in die Außenseite der den Kameras zugewandten Glasplatte (nicht für die Rekonstruktion benötigt)
- Rechts - Rückseitenkreuz (eingekerbt in die Innenseite der den Kameras gegenüberliegenden Seite)

---

### Exkurs: Räumliches Sehen

Das räumliche Sehvermögen des Menschen beruht auf dem gleichen Prinzip: Statt der beiden Kameras sind es dabei die beiden Augen, welche sich in einem bestimmten Abstand voneinander befinden und das gleiche Objekt abbilden. Die Bilder des Objektes auf der Netzhaut weisen ebenfalls eine Verschiebung gegeneinander auf. Das Gehirn kann daraus Rückschlüsse auf die Entfernung zum Objekt ziehen.



**Abbildung 2:** Das Bild des roten Objektes erscheint an verschiedenen Orten auf der Netzhaut. Das blaue Objekt ist fixiert. Durch die Verschiebung der Bilder entsteht der Tiefeneindruck. Bildquelle: <http://irtel.uni-mannheim.de/lehre/seminararbeiten/w96/Tiefe/binoc.html>.

## Geometrische Rekonstruktionen mit Blasenkammeraufnahmen

Die Verschiebung kann ausgenutzt werden, um die  $z$ -Koordinaten der Teilchenspuren zu rekonstruieren. Dabei macht man sich zunutze, dass die Tiefe, d.h. die  $z$ -Koordinate, mit  $z_R = 50,5 \text{ cm}$  für die Rückseitenkreuze bekannt ist.

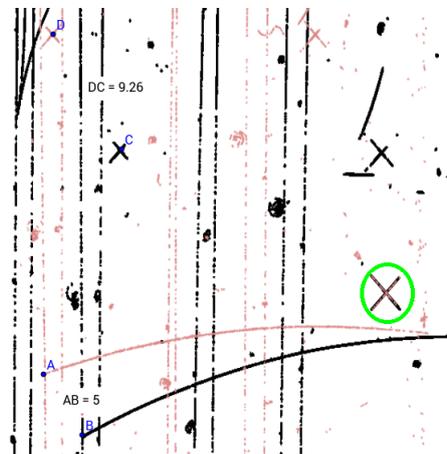
Um die  $z$ -Koordinate eines anderen Punktes zu ermitteln, müssen die beiden Aufnahmen so gegeneinander verschoben werden, dass zwei gleiche Vorderseitenkreuze übereinander liegen. Die Vorderseitenkreuze besitzen die  $z$ -Koordinate  $z_V = 0 \text{ cm}$ . Alle Punkte, die sich ebenfalls in der Tiefe  $z = 0 \text{ cm}$  befinden, liegen nun ebenfalls übereinander.

Für die anderen Punkte gilt:

Je größer ihre  $z$ -Koordinate ist, desto größer ist der Abstand ihrer beiden Abbilder.

Durch Messung der Abstände zwischen den beiden Abbildern eines Rückseitenkreuzes  $d_R$  und den Abbildern des betrachteten Punktes  $d_P$  kann die  $z$ -Koordinate dieses Punktes  $z_P$  bestimmt werden mit:

$$z_P = 50,5 \text{ cm} \cdot \frac{d_P}{d_R}.$$



**Abbildung 3:** Die Vorderseitenkreuze von View 2 (schwarze Blasenkammeraufnahme) und View 1 (farbige Blasenkammeraufnahme) werden übereinander gelegt (grüner Kreis). Die Verschiebungen eines Rückseitenkreuzes ( $C$  und  $D$ ) und des Anfangspunktes der Spur ( $A$  und  $B$ ) werden gemessen.



## Geometrische Rekonstruktionen mit Blasenkammeraufnahmen

Der Impuls eines Teilchens kann aus dem Krümmungsradius der Spur, welche es hinterlassen hat, berechnet werden. Eine Möglichkeit diesen Radius  $r$  zu bestimmen, bietet die Sagitta-Methode.

Um diese Methode anwenden zu können, müssen zwei Punkte  $A$  und  $B$  auf dem Kreisbogen bekannt sein. Auf ihrer Sehne, welche die Länge  $l_s$  besitzt, wird die Mittelsenkrechte konstruiert. Der Teil der Mittelsenkrechten, welcher zwischen dem Bogen und der Sehne liegt, besitzt die Länge  $d_{ss}$ .

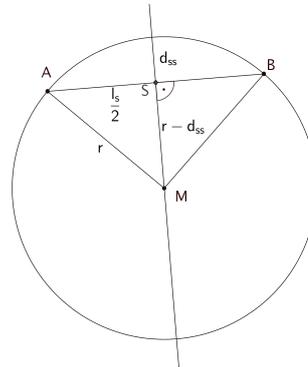
Nach dem Satz des Pythagoras gilt:

$$r^2 = \left(\frac{l_s}{2}\right)^2 + (r - d_{ss})^2.$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich:

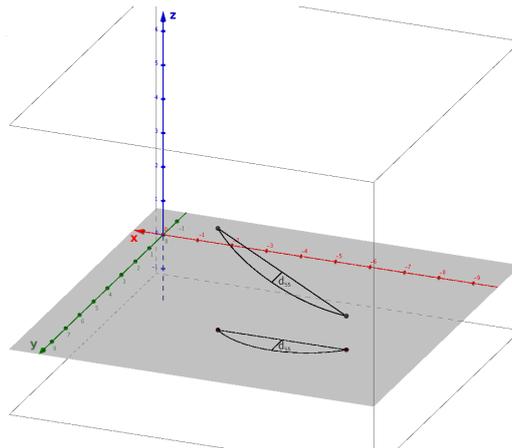
$$r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}.$$

Mit den beiden Längen  $l_s$  und  $d_{ss}$  lässt sich damit der Radius berechnen.



Für einen Kreis, welcher sich im Raum befindet, gilt diese Gleichung ebenfalls, wenn die Maße  $l_s$  und  $d_{ss}$  folgendermaßen gemessen werden:

- Abstandsbestimmung der beiden gegebenen Punkte des Kreisbogens ( $l_s$ )
- Messung des Abstandes zwischen Mittelpunkt der Sehne über dem projizierten Kreisbogen und dem projizierten Kreisbogen selbst in View 2 ( $d_{ss}$ )



**Abbildung 5:** Wiederum unter der Annahme, dass die Geschwindigkeit in  $z$ -Richtung konstant ist, liegt die Strecke  $d_{ss}$  in einer Ebene senkrecht zur  $z$ -Achse und ihr Abbild in View 2 hat damit die gleiche Länge wie ihr Original. Die Länge der Sehne  $l_s$  wird im Raum gemessen.

---

## Zusammengesetzte Teilchen - Hadronen

Die Spuren auf den Blasenkammeraufnahmen stammen nicht nur von Teilchen wie Protonen, Elektronen oder Positronen. Einige Spuren stammen auch von anderen Elementarteilchen oder aus ihnen zusammengesetzten Teilchen.

Teilchen, welche aus Quarks zusammengesetzt sind, werden Hadronen genannt. Man unterscheidet dabei zwischen Mesonen und Baryonen.

Ein Meson besteht aus einem Quark-Anti-Quark-Paar. Ein Beispiel für Mesonen ist das elektrisch positiv geladene Pion  $\pi^+$ , welches auch einfach positives Pion genannt wird. Es besteht aus einem Up-Quark und einem Anti-Down-Quark.

Baryonen bestehen aus drei Quarks. Die wohl bekanntesten Baryonen sind das Proton und das Neutron. Das Proton besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark während das Neutron aus einem Up-Quark und zwei Down-Quarks zusammengesetzt ist.

---

### Exkurs: Streuung

Trifft ein Proton des einlaufenden Strahls auf ein Proton des Wasserstoffs, welcher bei der 2 m großen Blaskammer als Kammerflüssigkeit dient, so kommt es zur Wechselwirkung der beiden Teilchen. Man spricht von Proton-Proton-Streuung (*pp*-Streuung). In der Teilchenphysik wird dabei elastische und inelastische Streuung unterschieden.

Ein elastischer Prozess ist dadurch gekennzeichnet, dass die Teilchen vor und nach der Wechselwirkung identisch sind und sich lediglich ihr Impuls und ihre Energie ändern. Bei einer elastischen Streuung von zwei Protonen sind also nach der Wechselwirkung immer noch zwei Protonen vorhanden. Der Impuls und damit die Energie der einzelnen Teilchen haben sich verändert.

Bei einem inelastischen Prozess sind die Teilchen vor und nach der Wechselwirkung nicht identisch. Es kommt zur Teilchenumwandlung bzw. Erzeugung von neuen Teilchen.

---

## Erhaltungssätze bei Wechselwirkungen von Teilchen

Da die Blasenkammer von einem homogenen Magnetfeld durchsetzt wird, kann aus der Krümmungsrichtung der Spur eines Teilchens auf das Vorzeichen seiner elektrischen Ladung geschlossen werden. Um ein Teilchen konkret zu identifizieren, müssen aber auch die Wechselwirkungen betrachtet werden, an welchen es beteiligt war.

Durch das Aufstellen von Umwandlungshypothesen, welche die Erhaltungssätze beachten, wird die Vielzahl an Möglichkeiten eingegrenzt. Letztendlich kann es durchaus möglich sein, dass mehrere Umwandlungshypothesen als zulässig anzusehen sind. Es kann also sein, dass keine eindeutige Identifikation eines Teilchens möglich ist.

Ein wichtiger Erhaltungssatz ist der Energierhaltungssatz. Im Falle der Blasenkammeraufnahmen, bei welchen die Strahlteilchen einen großen Eingangsimpuls besitzen, muss darauf geachtet werden, dass eine relativistische Betrachtung der Energie erfolgt. Die Energie eines Teilchens berechnet sich im relativistischen Fall über die Energie-Impuls-Beziehung:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}.$$

Der Impuls ist ebenfalls bei jeder Wechselwirkung erhalten. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Impuls eine vektorielle Größe ist.

---

### Exkurs: Einheiten in der Teilchenphysik

Als Einheit für die Energie wird in der Teilchenphysik Elektronenvolt (eV) verwendet. Es werden die üblichen Vorsätze, wie beispielsweise Mega und Kilo, genutzt, um Vielfache dieser Einheit zu bilden. Umgerechnet in die SI-Einheit Joule ergibt sich

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

Die Masse von Teilchen wird angegeben in der Einheit  $\frac{\text{eV}}{c^2}$  bzw. Vielfachen davon. Diese Einheit ergibt sich aus der Äquivalenz von Masse  $m$  und Ruheenergie  $E_0$

$$E_0 = m \cdot c^2.$$

Die Geschwindigkeiten werden in Einheiten von, d.h. als Vielfache von,  $c$  gemessen. Für den Impuls ergibt sich dann aus

$$p = \gamma \cdot m \cdot v$$

die Einheit  $\frac{\text{eV}}{c}$ .

Werden Masse und Impuls in den vorgestellten Einheiten verwendet, so erleichtert sich beispielsweise der Umgang mit der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung, denn die Konstante  $c$  kürzt sich an allen Stellen heraus und es muss somit nie ihr Wert eingesetzt werden.

---

## Erhaltungssätze bei Wechselwirkungen von Teilchen

Ein weiterer Erhaltungssatz betrifft die Ladungen. Bei jeder Wechselwirkung müssen sowohl die Summe der elektrischen als auch der schwachen Ladungszahlen erhalten sein. (Es gilt natürlich auch Erhaltung der starken Ladung, allerdings sind alle auf Blaskammeraufnahmen beobachteten Teilchen farbladungsneutral.)

Baryonen und Mesonen, welche Strange-Quarks enthalten, wird eine weitere Eigenschaft zugeschrieben, die sogenannte „Strangeness“. Jedes Strange-Quark trägt dabei mit  $-1$  zur Strangeness bei und jedes Anti-Strange-Quark mit  $+1$ . Die Strangeness bildet eine Besonderheit unter den Erhaltungsgrößen. Sie ist unter der starken und elektromagnetische Wechselwirkung erhalten, kann aber durch die schwache Wechselwirkung geändert werden. Teilchen, welche eine Strangeness besitzen, werden über die starke oder die elektromagnetische Wechselwirkung immer paarweise erzeugt.

Bei der Auswertung der Blaskammeraufnahmen muss daher bei Wechselwirkungen, an denen in der Ausgangssituation keine Teilchen mit Strangeness beteiligt sind, die Erhaltung der Strangeness beachtet werden. Der Zerfall eines Teilchens mit Strangeness geschieht über die schwache Wechselwirkung, d.h. bei diesem Prozess ändert sich die Strangeness.

Bei der Betrachtung von Spuren auf Blaskammeraufnahmen kann auch die Dichte der Blasen, also die Dicke der Spur beachtet werden. Anhand der Blasendichte lässt sich ein Rückschluss auf die Masse eines Teilchens ziehen. Ein massereicherer Teilchen hinterlässt bei gleichem Impuls eine dichtere und damit dickere Spur als ein leichteres Teilchen.

## Impulsberechnung

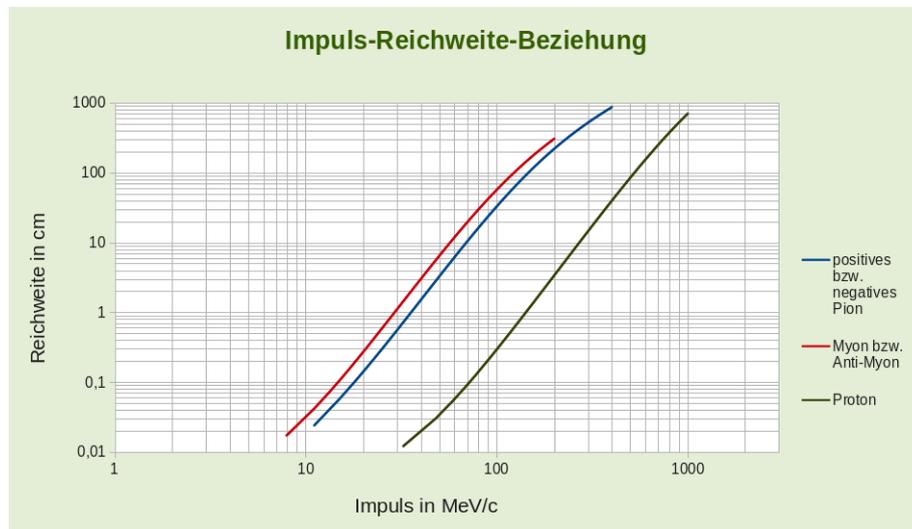
Der Impuls von Teilchen, welche Spuren auf den Blaskammeraufnahmen hinterlassen haben, kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Aufgrund des homogenen Magnetfeldes  $B$ , welches die Blaskammer durchsetzt, gibt der Krümmungsradius  $r$  einer Spur Auskunft über den Impuls des Teilchens:

$$p = 0,3 \cdot B \cdot r.$$

Werden in diese Gleichung die Stärke des Magnetfeldes in der Einheit Tesla und der Radius in der Einheit Meter eingesetzt, so erhält man als Einheit für den Betrag des Impulses  $\frac{\text{GeV}}{c}$ .

Eine zweite Möglichkeit, den Impuls eines Teilchens anhand von Blaskammeraufnahmen zu messen, basiert darauf, dass das Teilchen beim Durchqueren der Kammer durch Wechselwirkungen mit der Kammerflüssigkeit Energie verliert. Größtenteils geschehen diese Wechselwirkungen mit den Hüllenelektronen der Atome der Kammerflüssigkeit und es kommt zur Anregung oder Ionisation dieser Atome. Es ergibt sich also ein Zusammenhang zwischen dem Impuls und der Reichweite eines Teilchens.

Bei der Auswertung der Blaskammeraufnahmen wird die Länge der Spur gemessen, welche der Reichweite des Teilchens entspricht, welches diese Spur hinterlassen hat. Anschließend wird in Tabellen nachgeschlagen oder im Graph der Impuls-Reichweite-Beziehung abgelesen, welchen Anfangsimpuls das Teilchen besaß.



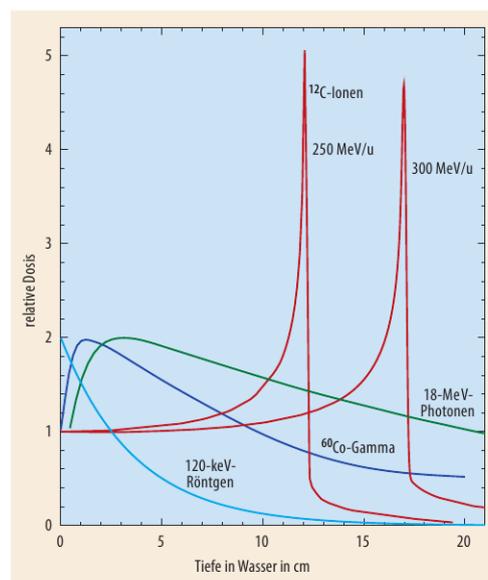
**Abbildung 6:** Die Impuls-Reichweite-Beziehung ist abhängig von der Masse des Teilchens. Entsprechend ergeben sich für unterschiedliche Teilchen, individuelle Reichweiten zu den gleichen Impulsen.

### Exkurs: Impuls-Reichweite-Beziehung in der Medizin

Die Abgabe der Energie eines elektrisch geladenen Teilchens an das Medium, welches es durchquert, ist abhängig vom Impuls des Teilchens. Am Ende der Teilchenbahn, also kurz bevor es zur Ruhe kommt, erreicht die Ionisationsintensität ein Maximum, den sogenannten Bragg-Peak.

Diese Eigenschaft wird bei der Therapie zur Behandlung von Krebs ausgenutzt. Elektrisch geladene Teilchen, beispielsweise Protonen oder Schwerionen, durchqueren das Körpergewebe und treten mit den Atomen in Wechselwirkung wie mit der Kammerflüssigkeit in der Blasenkanne. Je langsamer die Teilchen werden, desto mehr Energie geben sie durch Ionisation ab bis das Maximum erreicht ist.

Ist nun der Tumor im Körper genau lokalisiert, kann der Eingangsimpuls der Strahlteilchen so eingestellt werden, dass dieses Maximum in der Eindringtiefe erreicht wird, wo sich der Tumor befindet. Dadurch werden gezielt Tumorzellen vernichtet und das umliegende Gewebe geschont.



**Abbildung 7:** Deponierte Energie-Dosis in Abhängigkeit von der Eindringtiefe: Bei elektrisch geladenen Teilchenstrahlen liegt das Maximum der deponierten Dosis am Ende der Reichweite. Bildquelle: Physikjournal 2/2006, "Schwere Geschütze gegen Krebs".



# C AB Neutronensterne

## C.1 Didaktische Hinweise

### Lernziele:

- Die Lernenden nennen die charakteristischen Merkmale von Neutronensternen (Anzahl einlaufender und auslaufender Spuren, Summe der elektrischen und schwachen Ladungszahlen sowie der Strangeness vor der Umwandlung).
- Sie stellen Umwandlungshypothesen für Neutronensterne unter der Voraussetzung, dass keine neutralen Teilchen bzw. dass ein Neutron entstanden ist, auf.
- Sie testen die aufgestellten Hypothesen hinsichtlich der Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladung, sowie der Strangeness.
- Die Schülerinnen und Schüler erkennen Neutronensterne auf Blasenkammeraufnahmen.

### Vorwissen<sup>1</sup>:

- Kenntnisse darüber, welche Teilchen in der Blasenkammer Spuren hinterlassen
- Kenntnis der Teilchen Proton, Neutron, Pion, Kaon
- Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladung bei einer Wechselwirkung von Teilchen
- Strangeness und deren Erhaltung bei Wechselwirkungen

### Link zum digitalen Arbeitsblatt:

- <http://tube.geogebra.org/m/VcICi3Ui>

### Weitere Voraussetzungen:

- Für die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* notwendig. Diese Liste sollte im Vorfeld ausgefüllt werden.

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen erlangen die Lernenden beim Bearbeiten der beiden Einführungen zu Blasenkammern.

## C.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Untersuchung von Neutronensternen<sup>a</sup>

Untersuchungsgegenstand dieser Übung sind Neutronensterne, das heißt Spurmuster auf Blasenkammerbildern, welche bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs entstehen.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Charakteristika eines Neutronensterns

Überlege, welche Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen und wie viele einlaufende Spuren es demnach gibt. Gib die Anzahl einlaufender Spuren an.

Die Anzahl beträgt: \_\_\_\_\_

Begründe deine Antwort.

---

---

---

---

Bei jeder Teilchenumwandlung muss die elektrische Ladung erhalten bleiben. Gib die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt: \_\_\_\_\_

Begründe deine Antwort rechnerisch.

---

<sup>a</sup>Dieser Begriff wird im Zusammenhang mit der Blasenkammer als Bezeichnung für das Spurmuster verwendet, welches bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs auf einer Blasenkammeraufnahme zu sehen ist. Es besteht kein Zusammenhang zu den astronomischen Neutronensternen.

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Die Summe der elektrischen Ladungszahlen der Teilchen, welche bei der Umwandlung entstehen, muss also ebenfalls diesen Wert ergeben. Entscheide, welche Schlussfolgerung sich über die Anzahl auslaufender Spuren damit ziehen lässt.

Die Anzahl auslaufender Spuren ist stets

gerade

ungerade

Begründe deine Antwort.

---

---

---

---

Um nun die Teilchen zu identifizieren, welche die Spuren hinterlassen haben, müssen Umwandlungshypothesen aufgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass auch die Summe der schwachen Ladungszahlen erhalten bleibt. Gib die Summe der schwachen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt: \_\_\_\_\_

Begründe deine Antwort rechnerisch.

---

Beachtet werden muss bei einer solchen Wechselwirkung von einem Neutron und einem Proton auch die Erhaltung der Strangeness. Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

Gib die Strangeness vor der Wechselwirkung an.

Die Strangeness beträgt: \_\_\_\_\_

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**2. Aufgabe - Aufstellen von Umwandlungshypothesen**

Stelle Hypothesen darüber auf, welche Teilchen bei dem markierten Neutronenstern die Spuren hinterlassen haben. Teste diese hinsichtlich der Ladungserhaltung und der Erhaltung der Strangeness.

**Neutronenstern A**

Anzahl auslaufender Spuren: \_\_\_\_\_

 $q$  ... elektrische Ladung $I$ ...schwache Ladung $S$ ...Strangeness

In der Spalte „Hypothese“ sollen die Teilchen genannt werden, welche die auslaufenden Spuren hinterlassen haben könnten.

Hypothese	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

**Neutronenstern B**

Anzahl auslaufender Spuren: \_\_\_\_\_

Hypothese	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
				<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Anhand der Spuren kann lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, welche geladenen Teilchen bei dem Prozess entstehen, nicht aber, ob eventuell auch ungeladene Teilchen entstehen. Stelle eine Hypothese unter der Voraussetzung auf, dass ein Neutron bei der Umwandlung entsteht und drei auslaufende Spuren vorhanden sind. Notiere hier die Teilchen, welche in diesem Fall bei der Umwandlung entstehen. Begründe deine Antwort.

---

---

---

---

### 3. Aufgabe - Finden eines Neutronensterns

Finde auf der Blasenkammeraufnahme einen Neutronenstern und markiere diesen, indem du den vorgegebenen Punkt V auf den Wechselwirkungspunkt setzt.

Begründe, warum es sich um einen Neutronenstern handelt. Notiere die Anzahl der auslaufenden Spuren und eine mögliche Umwandlungshypothese.

---

---

---

---

## C.3 Lösungsblatt

*Lösung*

### Untersuchung von Neutronensternen<sup>a</sup>

Untersuchungsgegenstand dieser Übung sind Neutronensterne, das heißt Spurmuster auf Blasenkammerbildern, welche bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs entstehen.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Charakteristika eines Neutronensterns

Überlege, welche Teilchen an der Wechselwirkung teilnehmen und wie viele einlaufende Spuren es demnach gibt. Gib die Anzahl einlaufender Spuren an.

Die Anzahl beträgt:   0  

Begründe deine Antwort.

Es gibt keine auslaufende Spur, weil das Neutron als elektrisch neutrales Teilchen keine Spur hinterlässt und das Proton vor der Wechselwirkung ruht.

Bei jeder Teilchenumwandlung muss die elektrische Ladung erhalten bleiben. Gib die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt:   +1  

Begründe deine Antwort rechnerisch.

$$q_p + q_n = +1 + 0 = +1$$

Die Summe der elektrischen Ladungszahlen der Teilchen, welche bei der Umwandlung entstehen, muss also ebenfalls diesen Wert ergeben. Entscheide, welche Schlussfolgerung sich über die Anzahl auslaufender Spuren damit ziehen lässt.

Die Anzahl auslaufender Spuren ist stets

- gerade  
 ungerade

Begründe deine Antwort.

Die Anzahl der auslaufenden Spuren muss ungerade sein, denn es muss genau ein positiv elektrisch geladenes Teilchen mehr entstanden sein als negativ elektrisch geladene Teilchen.

<sup>a</sup>Dieser Begriff wird im Zusammenhang mit der Blasenkammer als Bezeichnung für das Spurmuster verwendet, welches bei der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Proton des Wasserstoffs auf einer Blasenkammeraufnahme zu sehen ist. Es besteht kein Zusammenhang zu den astronomischen Neutronensternen.

*Lösung*

Um nun die Teilchen zu identifizieren, welche die Spuren hinterlassen haben, müssen Umwandlungshypothesen aufgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass auch die Summe der schwachen Ladungszahlen erhalten bleibt. Gib die Summe der schwachen Ladungszahlen vor der Umwandlung an.

Sie beträgt: 0

Begründe deine Antwort rechnerisch.

$$I_p + I_n = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

Beachtet werden muss bei einer solchen Wechselwirkung von einem Neutron und einem Proton auch die Erhaltung der Strangeness. Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

Gib die Strangeness vor der Wechselwirkung an.

Die Strangeness beträgt: 0

## 2. Aufgabe - Aufstellen von Umwandlungshypothesen

Stelle Hypothesen darüber auf, welche Teilchen bei dem markierten Neutronenstern die Spuren hinterlassen haben. Teste diese hinsichtlich der Ladungserhaltung und der Erhaltung der Strangeness.

### Neutronenstern A

Anzahl auslaufender Spuren: 3

$q$  ... elektrische Ladung  
 $I$ ...schwache Ladung  
 $S$ ...Strangeness  
 In der Spalte „Hypothese“ sollen die Teilchen genannt werden, welche die auslaufenden Spuren hinterlassen haben könnten.

Hypothese <sup>a</sup>	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	+1	+1	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p \pi^+ \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p K^+ \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	+1	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$\pi^+ \pi^- \pi^-$	-1	-1	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p p \pi^-$	+1	0	0	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

<sup>a</sup>Die hier angegebenen Hypothesen sind eine Auswahl. Es gibt weitere nicht zulässige Hypothesen.

Lösung

**Neutronenstern B**Anzahl auslaufender Spuren: 5

Hypothese <sup>a</sup>	$q$	$I$	$S$	Zulässig?
$p \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$\pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	+1	+1	0	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p \pi^+ K^+ \pi^- \pi^-$	+1	$+\frac{1}{2}$	+1	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> Nein
$p p \pi^+ \pi^- \pi^-$ <sup>b</sup>	+1	0	0	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
$p p K^+ K^- \pi^-$ <sup>b</sup>	+1	0	0	<input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Anhand der Spuren kann lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, welche geladenen Teilchen bei dem Prozess entstehen, nicht aber, ob eventuell auch ungeladene Teilchen entstehen. Stelle eine Hypothese unter der Voraussetzung auf, dass ein Neutron bei der Umwandlung entsteht und drei auslaufende Spuren vorhanden sind. Notiere hier die Teilchen, welche in diesem Fall bei der Umwandlung entstehen. Begründe deine Antwort.

Bei der Umwandlung entstehen ein Proton, ein Neutron, ein positiv elektrisch geladenes Pion und ein negativ elektrisch geladenes Pion, denn dann ist die Summe der elektrischen Ladungszahlen nach der Umwandlung +1, die Summe der schwachen Ladungszahlen 0 und die Strangeness ebenfalls 0. Es ist auch möglich, dass ein Proton, ein Neutron, ein positiv elektrisch geladenes Kaon und ein negativ elektrisch geladenes Kaon entstehen, weil auch dann die elektrische und die schwache Ladung sowie die Strangeness erhalten sind.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Die hier angegebenen Hypothesen sind eine Auswahl. Es gibt weitere nicht zulässige Hypothesen.

<sup>b</sup>Es ist ausreichend, wenn der Lernende eine korrekte Hypothese findet.

<sup>c</sup>Es ist ausreichend, wenn der Lernende eine der beiden Lösungen notiert.

*Lösung*

### 3. Aufgabe - Finden eines Neutronensterns

Finde auf der Blasenkammeraufnahme einen Neutronenstern und markiere diesen, indem du den vorgegebenen Punkt V auf den Wechselwirkungspunkt setzt.

Begründe, warum es sich um einen Neutronenstern handelt. Notiere die Anzahl der auslaufenden Spuren und eine mögliche Umwandlungshypothese.

Es handelt sich um einen Neutronenstern, weil keine einlaufenden Spuren zum Wechselwirkungspunkt führen und eine ungerade Anzahl von auslaufenden Spuren sichtbar ist.

Lösung 1: Der Neutronenstern hat drei auslaufende Spuren. Mögliche Umwandlungshypothesen sind:<sup>b</sup>

- $p p \pi^-$
- $p n \pi^+ \pi^-$
- $p n K^+ K^-$

Lösung 2: Der Neutronenstern hat fünf auslaufende Spuren. Mögliche Umwandlungshypothesen sind:<sup>b</sup>

- $p p \pi^+ \pi^- \pi^-$
- $p p K^+ K^- \pi^-$
- $p n \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$
- $p n K^+ K^- \pi^+ \pi^-$
- $p n K^+ K^- K^+ K^-$

<sup>b</sup>Die Koordinaten der Neutronensterne sind für Lösung 1 (33,8; 112,2) und für Lösung 2 (33,4; 119,5). Es ist ausreichend, wenn der Lernende einen Neutronenstern identifiziert und eine Umwandlungshypothese angibt. Bei den hier angegebenen Hypothesen handelt es sich um eine Auswahl.



# D AB 2663

## D.1 Didaktische Hinweise

### Lernziele:

- Die Schülerinnen und Schüler bestimmen den Impuls eines Teilchens aus der Krümmung der Spur, welche es in der Blaskammer hinterlassen hat.
- Sie bestimmen den Impuls aus der Reichweite des Teilchens.
- Die Lernenden beschreiben mögliche Probleme, welche bei der Anwendung der Methoden auftreten können.
- Sie vergleichen die beiden Methoden zur Impulsberechnung hinsichtlich der Kriterien für ihre Anwendbarkeit auf zu untersuchende Spuren.

### Vorwissen:

- Kenntnisse über die Bewegung elektrisch geladener Teilchen im Magnetfeld:
  - Zusammenhang zwischen Krümmungsrichtung einer Spur und Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens, welches diese hinterlassen hat (Rechte-Hand-Regel)
  - Wirkung der Lorentzkraft als Radialkraft
  - Impulsberechnung mittels  $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ <sup>1</sup>
- Zusammenhang zwischen der Masse eines Teilchens und Dicke der Spur<sup>1</sup>
- Grundlagen der räumlichen Rekonstruktion mit Blaskammeraufnahmen<sup>1</sup>
- Kenntnis der geometrischen Begriffe Mittelsenkrechte und Sehne
- Wissen, dass die Spurlänge der Reichweite des Teilchens entspricht<sup>1</sup>
- Zusammenhang zwischen Energieverlust des Teilchens durch Ionisation und der Länge (Impuls-Reichweite-Beziehung)<sup>1</sup> sowie dem Krümmungsradius der Spur (spiralförmige Spuren),
- Umgang mit der Einheit  $\frac{eV}{c}$

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen können die Lernenden in der *Einführung in die fortgeschrittene Auswertung von Blaskammeraufnahmen* erwerben.

**Link zum digitalen Arbeitsblatt:**

- <http://tube.geogebra.org/m/vjI67Sf6>

**Weitere Voraussetzungen:**

- Das Zusatzmaterial *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* soll anhand dieses Arbeitsblattes nachvollzogen werden. Die Lernenden können sich auch zusätzliche Notizen auf dem Zusatzmaterial anfertigen.
- Für die Bearbeitung des Arbeitsblattes kann die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* hilfreich sein.

## D.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Impulsberechnung - 3D

#### Vergleich zweier Methoden

In dieser Übung sollen zwei Methoden der Impulsberechnung miteinander verglichen werden. Dazu soll die grün hervorgehobene Spur betrachtet und der Impuls des Teilchens, welches diese Spur hinterlassen hat, berechnet werden.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### Vorüberlegung - Identifikation des Teilchens

Überlege, welches Teilchen die Spur hinterlassen hat. Ein Proton des Teilchenstrahls ist mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung getreten. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus. Gib unter Beachtung der Krümmungsrichtung der Spur und der Blasendichte eine Vermutung an.

Es handelt sich um ein: \_\_\_\_\_

Begründe deine Vermutung.

---

---

---

---

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**1. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Krümmung der Spur**Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur

Zeige View 1 an und verschiebe dieses Bild auf die Blasenkammeraufnahme (View 2), sodass zwei Vorderseitenkreuze übereinander liegen.

Miss die Abstände

- $d_R$  zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,
- $d_A$  zwischen den beiden Anfangspunkten,
- $d_E$  zwischen den beiden Endpunkten.

Berechne aus den Werten die  $z$ -Koordinaten des Anfangs- und des Endpunktes.

$$z_{Anfang} =$$

$$z_{Ende} =$$

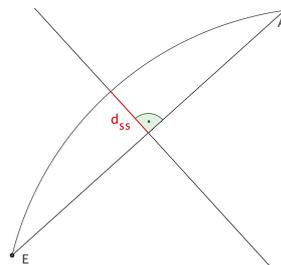
Notizen zu Schritt 1: (Hier können Zwischenergebnisse notiert werden.)

Schritt 2: Bestimmung des Krümmungsradius

Berechne die Länge der Sehne  $l_s$  zwischen Start- und Endpunkt der Spur aus den dreidimensionalen Koordinaten.Konstruiere eine Mittelsenkrechte auf der Sehne in View 2 und bestimme dort den Abstand  $d_{ss}$  zwischen Spur und der Sehne.

$$l_s =$$

$$d_{ss} =$$



Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Berechne mithilfe der folgenden Formel nun den Radius:

$$r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}$$

$r =$

Schritt 3: Berechnung des Impulses

Berechne aus dem von dir bestimmten Krümmungsradius den Impuls des Teilchens. Das Magnetfeld beträgt 1,74 T.

$$p_1 = \frac{GeV}{c} = \frac{MeV}{c}$$

Überlege dir zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses aus der Krümmung einer Teilchenspur auftreten können:

- 
- 

## 2. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Reichweite des Teilchens

Nun soll der Impuls des gleichen Teilchens mit einer zweiten Methode erneut bestimmt werden.

Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinate eines dritten Spurpunktes

Lege den Punkt  $SP$  auf die Spur. Miss die Länge  $l_{ges}$  der Spur insgesamt und die Länge  $l$  zwischen Anfangspunkt und deinem neuen Punkt.

Berechne daraus die  $z$ -Koordinate.

$z_{SP} =$

Schritt 2: Bestimmung der dreidimensionalen Spurlänge

Rekonstruiere auch deinen Spurpunkt in der 3D-Ansicht. Erzeuge nun einen Kreis durch die drei rekonstruierten Punkte (Anfangs-, Spur- und Endpunkt) in der 3D-Ansicht. Miss die Bogenlänge.

Die Reichweite des Teilchens beträgt: \_\_\_\_\_.

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Schritt 3: Bestimmung des Impulses aus der Reichweite

Über die Impuls-Reichweite-Beziehung kann aus der von dir bestimmten Reichweite der Impuls des Teilchens bestimmt werden.

Öffne dazu den Link, der unterhalb des digitalen Arbeitsblatts steht in einem neuen Tab. Du gelangst zur Impuls-Reichweite-Beziehung für Protonen in Wasserstoff.

Trage hier den aus der Reichweite bestimmten Impuls ein:

$$p_2 =$$

Überlege dir auch für diese Methode zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses auftreten können:

- 
- 

### 3. Aufgabe - Vergleich der Methoden zur Impulsberechnung

Fülle die Tabelle aus!

	Impulsberechnung aus	
	der Krümmung der Spur	der Reichweite des Teilchens
berechneter Impuls		
Vergleich der Impulse und der Eignung der Methoden am Beispiel		
Kriterien für die Anwendbarkeit der Methode		

## D.3 Lösungsblatt

Lösungsblatt

### Impulsberechnung - 3D

#### Vergleich zweier Methoden

In dieser Übung sollen zwei Methoden der Impulsberechnung miteinander verglichen werden. Dazu soll die grün hervorgehobene Spur betrachtet und der Impuls des Teilchens, welches diese Spur hinterlassen hat, berechnet werden.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### Vorüberlegung - Identifikation des Teilchens

Überlege, welches Teilchen die Spur hinterlassen hat. Ein Proton des Teilchenstrahls ist mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung getreten. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus. Gib unter Beachtung der Krümmungsrichtung der Spur und der Blasendichte eine Vermutung an.

Es handelt sich um ein: Proton

Begründe deine Vermutung.

Die Krümmungsrichtung der Spur lässt nach der Rechten-Hand-Regel auf ein elektrisch positiv geladenes Teilchen schließen. Es kommen also Proton, positives Pion und positives Kaon in Frage. Aufgrund der hohen Blasendichte, das heißt der Dicke der Spur, lässt sich auf das schwere Proton schließen.

#### 1. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Krümmung der Spur

Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur

Zeige View 1 an und verschiebe dieses Bild auf die Blasenkammeraufnahme (View 2), sodass zwei Vorderseitenkreuze übereinander liegen.

Miss die Abstände

- $d_R$  zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,
- $d_A$  zwischen den beiden Anfangspunkten,
- $d_E$  zwischen den beiden Endpunkten.

Berechne aus den Werten die  $z$ -Koordinaten des Anfangs- und des Endpunktes.

$$z_{Anfang} = (29,45 \pm 5,89) \text{ cm}^a$$

$$z_{Ende} = (23,88 \pm 4,78) \text{ cm}^a$$

<sup>a</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

## Lösungsblatt

Notizen zu Schritt 1:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen anfertigen, z.B.:

$$d_R = 9,19 \text{ cm}$$

$$d_A = 5,36 \text{ cm}$$

$$d_E = 4,35 \text{ cm}$$

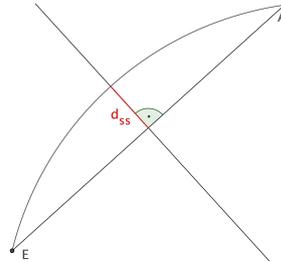
Schritt 2: Bestimmung des Krümmungsradius

Berechne die Länge der Sehne  $l_s$  zwischen Start- und Endpunkt der Spur aus den dreidimensionalen Koordinaten.

Konstruiere eine Mittelsenkrechte auf der Sehne in View 2 und bestimme dort den Abstand  $d_{ss}$  zwischen Spur und der Sehne.

$$l_s = 17,36 \text{ cm}^b$$

$$d_{ss} = (0,49 \pm 0,09) \text{ cm}^a$$



Berechne mithilfe der folgenden Formel nun den Radius:

$$r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}$$

$$r = 77,13 \text{ cm}^b$$

Schritt 3: Berechnung des Impulses

Berechne aus dem von dir bestimmten Krümmungsradius den Impuls des Teilchens. Das Magnetfeld beträgt 1,74 T.

$$p_1 = 0,403 \frac{\text{GeV}}{c} = 403 \frac{\text{MeV}}{c}^b$$

<sup>a</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

<sup>b</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Im digitalen Arbeitsblatt wird entsprechend der Eingaben des Lernenden Feedback gegeben.

Überlege dir zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses aus der Krümmung einer Teilchenspur auftreten können:

- Wenn das Teilchen einen großen Impuls besitzt, wird die Krümmung der Spur sehr groß und damit die Messung der Krümmung ungenau bzw. die Krümmung ist dann nicht mehr erkennbar.
- Bei sehr kurzen Spuren erhöht sich ebenfalls die Ungenauigkeit.
- Der Impuls des Teilchens verringert sich beim Durchqueren der Kammer und die Krümmung der Spur ändert sich. Ist diese Änderung besonders stark (z.B. bei der spiralförmigen Bahn eines Elektron), so ist die dreidimensionale Berechnung des Impulses über die Krümmung komplizierter.

## 2. Aufgabe - Impulsberechnung aus der Reichweite des Teilchens

Nun soll der Impuls des gleichen Teilchens mit einer zweiten Methode erneut bestimmt werden.

Schritt 1: Bestimmung der  $z$ -Koordinate eines dritten Spurpunktes

Lege den Punkt  $SP$  auf die Spur. Miss die Länge  $l_{ges}$  der Spur insgesamt und die Länge  $l$  zwischen Anfangspunkt und deinem neuen Punkt.

Berechne daraus die  $z$ -Koordinate.

$$z_{SP} = \quad \text{Je nach gewähltem Punkt ergibt sich hier ein Wert,} \\ \text{welcher zwischen der Tiefe des Anfangs- und Endpunktes liegt.}$$

Schritt 2: Bestimmung der dreidimensionalen Spurlänge

Rekonstruiere auch deinen Spurpunkt in der 3D-Ansicht. Erzeuge nun einen Kreis durch die drei rekonstruierten Punkte (Anfangs-, Spur- und Endpunkt) in der 3D-Ansicht. Miss die Bogenlänge.

Die Reichweite des Teilchens beträgt: 17,38 cm<sup>b</sup>.

Schritt 3: Bestimmung des Impulses aus der Reichweite

Über die Impuls-Reichweite-Beziehung kann aus der von dir bestimmten Reichweite der Impuls des Teilchens bestimmt werden.

Öffne dazu den Link, der unterhalb des digitalen Arbeitsblatts steht in einem neuen Tab. Du gelangst zur Impuls-Reichweite-Beziehung für Protonen in Wasserstoff.

Trage hier den aus der Reichweite bestimmten Impuls ein:

$$p_2 = (315 \pm 10) \frac{\text{MeV}}{c} \text{ }^a$$

Überlege dir auch für diese Methode zwei Probleme, welche bei der Berechnung des Impulses auftreten können:

- Die Spur endet nicht innerhalb der Blaskammer.
- Die Spur ist sehr lang und kann deshalb nicht mittels eines einfachen Bogens beschrieben werden (z.B. spiralförmige Spur des Elektron).

*Lösungsblatt***3. Aufgabe - Vergleich der Methoden zur Impulsberechnung**

Fülle die Tabelle aus!

	Impulsberechnung aus	
	der Krümmung der Spur	der Reichweite des Teilchens
berechneter Impuls	$403 \frac{\text{MeV}}{c}$	$315 \frac{\text{MeV}}{c}$
Vergleich der Impulse und der Eignung der Methoden am Beispiel	Die beiden Impulse liegen etwa in der gleichen Größenordnung. (Dies bestätigt auch die Vermutung, dass es sich um ein Proton handelt.) Aufgrund der geringen Krümmung und der Kürze der Spur eignet die zweite Methode besser und liefert genauere Ergebnisse.	
Kriterien für die Anwendbarkeit der Methode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spur nicht zu kurz</li> <li>• ausreichende Krümmung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfangs- und Endpunkt der Spur liegen in der Kammer</li> <li>• Spur möglichst kurz</li> </ul>

# E AB 2806

## E.1 Didaktische Hinweise

### Lernziele:

- Die Lernenden berechnen den Impuls des Myon-Neutrinos in dem Fall, dass das Pion bei der Umwandlung ruht, mithilfe des Energieerhaltungssatzes und der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung.
- Die Schülerinnen und Schüler wenden eine geeignete Methode zur Impulsberechnung bei der Spur des Anti-Myons an.
- Sie begründen mithilfe des Impulserhaltungssatzes qualitativ die Entstehung von elektrisch neutralen Teilchen anhand des Spurmusters auf der Blasenkammeraufnahme.

### Vorwissen:

- Kenntnis der Teilchen Pion, Anti-Myon, Myon-Neutrino, Positron, Anti-Elektron-Neutrino
- Zusammenhang zwischen Krümmungsrichtung einer Spur und Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens, welches diese hinterlassen hat (Rechte-Hand-Regel)
- Energieerhaltungssatz und relativistische Energie-Impuls-Beziehung
- Methoden der Impulsberechnung anhand von Blasenkammeraufnahmen und deren Kriterien zur Anwendbarkeit<sup>1</sup>
- Nutzung des Impulserhaltungssatzes zum Rückschluss auf neutrale Teilchen anhand von Blasenkammeraufnahmen

### Link zum digitalen Arbeitsblatt:

- <http://tube.geogebra.org/m/SbVHkFAX>

### Weitere Voraussetzungen:

- Für die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* notwendig. Diese Liste sollte im Vorfeld ausgefüllt werden.
- Das Zusatzmaterial *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* ist hilfreich für das Lösen der Aufgaben.

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen erlangen die Lernenden bei der Bearbeitung von AB 2663.

## E.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Die Umwandlung des Pions

Dieses Arbeitsblatt behandelt die Umwandlung eines elektrisch geladenen Pions und die darauf folgende Umwandlung der Produkte.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Identifikation des Teilchens

Die grün hervorgehobene Spur wurde von einem Pion erzeugt. Entscheide, um welches Pion es sich gehandelt hat. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

$\pi^0$

$\pi^+$

$\pi^-$

Begründe deine Antwort.

---

---

---

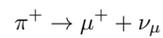
---

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### 2. Aufgabe - Theoretische Betrachtung des Impulses des Anti-Myons

Am Ende der grün markierten Spur ist eine weitere Umwandlung erkennbar. Das Pion wandelt sich in ein Anti-Myon um, welches die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat:



Ruht das Pion bei dieser Umwandlung, so besitzen Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impuls.

Berechne diesen Impuls mithilfe des Energieerhaltungssatzes. Nutze die relativistische Energie-Impuls-Beziehung und runde auf ganze Zahlen.

$$E_{\text{vorher}} =$$

$$=$$

$$p_{\mu 1} =$$

$$=$$

Notizen zur Berechnung des Impulses: (Hier kann der Rechenweg notiert werden.)

### 3. Aufgabe - Messung des Impulses des Anti-Myons

Um nun zu untersuchen, ob das Pion vor der Umwandlung in Ruhe war, muss der Impuls des Anti-Myons aus der Blasenkammeraufnahme ermittelt und der gemessene mit dem berechneten Wert verglichen werden.

Entscheide, welche Methode sich zur Bestimmung des Impulses des Anti-Myons eignet.

- Berechnung aus der Krümmung der Spur
- Berechnung aus der Reichweite des Teilchens

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Berechne nun mithilfe dieser Methode den Impuls des Anti-Myons.

$$p_{\mu 2} =$$

Notizen zur Bestimmung des Impulses: (Hier können Zwischenergebnisse notiert werden.)

#### 4. Aufgabe - Schlussfolgerung

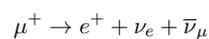
Der berechnete Wert für den Impuls des Anti-Myons kann nun mit dem gemessenen Wert verglichen werden.

Kreuze die Schlussfolgerungen an, welche sich ergeben.

- Das Pion ruhte nahezu vor der Umwandlung.
- Die Annahme, dass das Pion vor der Umwandlung ruhte, hat sich nicht bestätigt.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls, der etwa gleich  $p_{\mu 2}$  ist.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls in Richtung der einlaufenden Spur des Pions.

#### 5. Aufgabe - Umwandlung des Anti-Myons

Das Anti-Myon selbst wandelt sich dann weiter in ein Positron (braun hervorgehobene Spur) um. Auch dabei entstehen Neutrinos:



Überprüfe diese Umwandlungshypothese anhand der Blasenkammeraufnahme, indem du die folgenden Punkte qualitativ begründest:

- positive elektrische Ladung des Teilchens, welches die braun hervorgehobene Spur hinterlassen hat
- Entstehung neutraler Teilchen bei der Umwandlung

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

---



---



---



---

## E.3 Lösungsblatt

Lösungsblatt

### Die Umwandlung des Pions

Dieses Arbeitsblatt behandelt die Umwandlung eines elektrisch geladenen Pions und die darauf folgende Umwandlung der Produkte.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Identifikation des Teilchens

Die grün hervorgehobene Spur wurde von einem Pion erzeugt. Entscheide, um welches Pion es sich gehandelt hat. Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

$\pi^0$                         $\pi^+$                         $\pi^-$

Begründe deine Antwort.

Nach der Rechten-Hand-Regel ergibt sich, dass das Teilchen, welches die grün hervorgehobene Spur hinterlassen hat, positiv elektrisch geladen ist. Es handelt sich also um das positive Pion  $\pi^+$ .

#### 2. Aufgabe - Theoretische Betrachtung des Impulses des Anti-Myons

Am Ende der grün markierten Spur ist eine weitere Umwandlung erkennbar. Das Pion wandelt sich in ein Anti-Myon um, welches die blau hervorgehobene Spur hinterlassen hat:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Ruht das Pion bei dieser Umwandlung, so besitzen Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impuls.

Berechne diesen Impuls mithilfe des Energieerhaltungssatzes. Nutze die relativistische Energie-Impuls-Beziehung und runde auf ganze Zahlen.

$$\begin{aligned} E_{\text{vorher}} &= \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} = \sqrt{(140 \text{ MeV})^2 + (0 \text{ MeV})^2} \\ &= 140 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{\mu 1} &= \frac{(140 \text{ MeV})^2 - (106 \text{ MeV})^2}{2 \cdot 140 \text{ MeV}} \cdot \frac{1}{c} \\ &= 30 \frac{\text{MeV}}{c} \end{aligned}$$

Notizen zur Berechnung des Impulses:

Der Energieerhaltungssatz für diese Umwandlung lautet:

$$\begin{aligned} E_{\text{vorher}} &= E_{\mu} + E_{\nu_{\mu}} \\ &= \sqrt{(m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2} + p_{\nu_{\mu}}c \end{aligned}$$

Unter der Bedingung, dass Anti-Myon und Myon-Neutrino den gleichen Impuls besitzen ergibt sich:

$$E_{\text{vorher}} = \sqrt{(m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2} + p_{\mu}c$$

Diese Gleichung muss nun umgestellt werden:

$$\begin{aligned} (E_{\text{vorher}} - p_{\mu}c)^2 &= (m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2 \\ E_{\text{vorher}}^2 - 2E_{\text{vorher}}p_{\mu}c + (p_{\mu}c)^2 &= (m_{\mu}c^2)^2 + (p_{\mu}c)^2 \\ E_{\text{vorher}}^2 - 2E_{\text{vorher}}p_{\mu}c &= (m_{\mu}c^2)^2 \\ p_{\mu} &= \frac{E_{\text{vorher}}^2 - (m_{\mu}c^2)^2}{2E_{\text{vorher}}} \cdot \frac{1}{c} \end{aligned}$$

### 3. Aufgabe - Messung des Impulses des Anti-Myons

Um nun zu untersuchen, ob das Pion vor der Umwandlung in Ruhe war, muss der Impuls des Anti-Myons aus der Blasenkameraaufnahme ermittelt und der gemessene mit dem berechneten Wert verglichen werden.

Entscheide, welche Methode sich zur Bestimmung des Impulses des Anti-Myons eignet.

- Berechnung aus der Krümmung der Spur <sup>a</sup>  
 Berechnung aus der Reichweite des Teilchens

Berechne nun mithilfe dieser Methode den Impuls des Anti-Myons.

$$p_{\mu 2} = 32 \pm 2 \frac{\text{MeV}}{c} \text{ } ^b$$

<sup>a</sup>Diese Methode ist aufgrund der Kürze der Spur nicht geeignet.

<sup>b</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

Notizen zur Bestimmung des Impulses:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen anfertigen, z.B.:

$$d_R = 9,06 \text{ cm}$$

$$d_A = 4,98 \text{ cm}$$

$$d_E = 5,23 \text{ cm}$$

$$l_{ges} = 0,49 \text{ cm}$$

$$l = 0,21 \text{ cm}$$

$$z_A = 27,76 \text{ cm}$$

$$z_E = 29,15 \text{ cm}$$

$$z_{SP} = 28,36 \text{ cm}$$

Reichweite: 1,47 cm

#### 4. Aufgabe - Schlussfolgerung

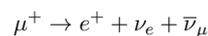
Der berechnete Wert für den Impuls des Anti-Myons kann nun mit dem gemessenen Wert verglichen werden.

Kreuze die Schlussfolgerungen an, welche sich ergeben.

- Das Pion ruhte nahezu vor der Umwandlung.
- Die Annahme, dass das Pion vor der Umwandlung ruhte, hat sich nicht bestätigt.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls, der etwa gleich  $p_{\mu 2}$  ist.
- Das Myon-Neutrino besitzt einen Impuls in Richtung der einlaufenden Spur des Pions.

#### 5. Aufgabe - Umwandlung des Anti-Myons

Das Anti-Myon selbst wandelt sich dann weiter in ein Positron (braun hervorgehobene Spur) um. Auch dabei entstehen Neutrinos:



Überprüfe diese Umwandlungshypothese anhand der Blasenkammeraufnahme, indem du die folgenden Punkte qualitativ begründest:

- positive elektrische Ladung des Teilchens, welches die braun hervorgehobene Spur hinterlassen hat
- Entstehung neutraler Teilchen bei der Umwandlung

Das Magnetfeld zeigt aus der Bildebene heraus.

Mithilfe der Rechten-Hand-Regel lässt sich feststellen, dass das Teilchen, welches die braun hervorgehobene Spur erzeugt hat, positiv elektrisch geladen ist.

Bei jeder Umwandlung gilt der Impulserhaltungssatz vektoriell. Wäre bei dieser Umwandlung nun lediglich das Positron entstanden, so müsste es sich in die gleiche Richtung weiterbewegen wie das Anti-Myon. Da allerdings ein Abknicken der Spur sichtbar ist, müssen bei der Umwandlung auch neutrale Teilchen entstanden sein.



# F AB 2930

## F.1 Didaktische Hinweise

- Die Schülerinnen und Schüler überprüfen Umwandlungshypothesen für die inelastische Proton-Proton-Streuung hinsichtlich der Erhaltung der Ladungen.
- Sie testen die Umwandlungshypothesen, indem sie den Energieerhaltungssatz anwenden.
- Die Lernenden wenden eine geeignete Methode der Impulsberechnung an.

### Vorwissen:

- Kenntnis der Teilchen Proton, Neutron, Pion
- Zusammenhang zwischen Krümmungsrichtung einer Spur und Vorzeichen der elektrischen Ladungszahl des Teilchens, welches diese hinterlassen hat (Rechte-Hand-Regel)
- Methoden der Impulsberechnung anhand von Blasenkammeraufnahmen und deren Kriterien zur Anwendbarkeit<sup>1</sup>
- Impulserhaltungssatz (insbesondere Beachtung der vektoriellen Form)
- Energieerhaltungssatz und relativistische Energie-Impuls-Beziehung

### Link zum digitalen Arbeitsblatt:

- <http://tube.geogebra.org/m/oqgCRSEJ>

### Weitere Voraussetzungen:

- Für die Bearbeitung dieses Arbeitsblattes ist die *Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften* notwendig. Diese Liste sollte im Vorfeld ausgefüllt werden.
- Das Zusatzmaterial *Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung* ist hilfreich für das Lösen der Aufgaben.

---

<sup>1</sup>Dieses Wissen erlangen die Lernenden bei der Bearbeitung von AB 2663.

## F.2 Arbeitsblatt

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Untersuchung inelastischer Proton-Proton-Streuung

Dieses Arbeitsblatt behandelt die inelastische Proton-Proton-Streuung. Dabei tritt ein Proton des Strahls mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung und es kommt zur Teilchenumwandlung.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Umwandlungshypothesen

Vom Wechselwirkungspunkt (Vertex) gehen zwei auslaufende Spuren aus, das heißt es sind zwei elektrisch geladene Teilchen entstanden. Es kann außerdem ein elektrisch neutrales Teilchen entstanden sein. Entscheide, welche Umwandlungshypothesen unter dieser Voraussetzung möglich sind.

- |  |  |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^+$ | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow n \pi^+ \pi^+$ |
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^-$ | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p p \pi^0$     |
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^0$ | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p p \pi^-$     |

Begründe deine Entscheidung.

---



---



---



---

#### 2. Aufgabe - Berechnung der Impulse der auslaufenden, geladenen Teilchen

Bestimme den Impuls der Teilchen, welche die blau markierte Spur (Teilchen 1) und die grün markierte Spur (Teilchen 2) hinterlassen haben. Wende eine der dir bekannten Methoden zur Impulsberechnung an.

Bestimme die z-Koordinate der Anfangs- und Endpunkte und entscheide dann, welche Methode du verwendest:

- Berechnung aus der Krümmung der Spur
- Berechnung aus der Reichweite des Teilchens

Notizen zur Bestimmung der z-Koordinaten:

---

*Name:**Datum:*

Notiere deine Ergebnisse hier.

$$p_1 =$$

$$p_2 =$$

Notizen zur Impulsberechnung:

**3. Aufgabe - Bestimmung des Impulses des neutralen Teilchens**

Bei der Wechselwirkung von Teilchen gilt der Impulserhaltungssatz. Um mit Hilfe dieses Satzes den Impuls des neutralen Teilchens bestimmen zu können, müssen die Richtungen ermittelt werden, in denen sich die beiden Teilchen vom Vertex entfernen. Ermittle den Impuls des neutralen Teilchens.

$$p =$$

**4. Aufgabe - Überprüfung der Hypothesen mit dem Energieerhaltungssatz**

Mithilfe des Energieerhaltungssatzes lassen sich nun die Umwandlungshypothesen testen. Berechne die Differenz  $\Delta E$  der Energien vor der Umwandlung und nach der Umwandlung für beide Hypothesen mittels der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung.

Führe die Berechnungen für beide Hypothesen durch und runde die Ergebnisse auf ganze Zahlen.

$$E_{\text{vorher}} =$$

$$=$$

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**Hypothese 1:**  $p p \rightarrow p p \pi^0$ 

$$E_{\text{nachher}} =$$

=

$$|\Delta E| =$$

=

**Hypothese 2:**  $p p \rightarrow p n \pi^+$ 

$$E_{\text{nachher}} =$$

=

$$|\Delta E| =$$

=

**5. Aufgabe - Entscheidung für eine Umwandlungshypothese**

Entscheide auf Grundlage deiner Berechnungen, welches neutrale Teilchen entstanden ist.

- Neutron  
 neutrales Pion

Begründe deine Entscheidung.

---



---



---



---

## F.3 Lösungsblatt

Lösungsblatt

### Untersuchung inelastischer Proton-Proton-Streuung

Dieses Arbeitsblatt behandelt die inelastische Proton-Proton-Streuung. Dabei tritt ein Proton des Strahls mit einem Proton des Wasserstoffs in Wechselwirkung und es kommt zur Teilchenumwandlung.

**Wichtig!** Du benötigst für dieses Arbeitsblatt die Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften.

**Wichtig!** Bearbeite parallel das digitale Arbeitsblatt.

#### 1. Aufgabe - Umwandlungshypothesen

Vom Wechselwirkungspunkt (Vertex) gehen zwei auslaufende Spuren aus, das heißt es sind zwei elektrisch geladene Teilchen entstanden. Es kann außerdem ein elektrisch neutrales Teilchen entstanden sein. Entscheide, welche Umwandlungshypothesen unter dieser Voraussetzung möglich sind.

- |   |   |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^+$ | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow n \pi^+ \pi^+$        |
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^-$            | <input checked="" type="checkbox"/> $p p \rightarrow p p \pi^0$ |
| <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p n \pi^0$            | <input type="checkbox"/> $p p \rightarrow p p \pi^-$            |

Begründe deine Entscheidung.

Die Erhaltung der elektrischen und schwachen Ladungszahlen ist nur bei diesen beiden Hypothesen gegeben. Die Summe der elektrischen Ladungszahlen vor der Umwandlung beträgt +2 und die Summe der schwachen Ladungszahlen beträgt +1.

#### 2. Aufgabe - Berechnung der Impulse der auslaufenden, geladenen Teilchen

Bestimme den Impuls der Teilchen, welche die blau markierte Spur (Teilchen 1) und die grün markierte Spur (Teilchen 2) hinterlassen haben. Wende eine der dir bekannten Methoden zur Impulsberechnung an.

Bestimme die z-Koordinate der Anfangs- und Endpunkte und entscheide dann, welche Methode du verwendest:

- Berechnung aus der Krümmung der Spur
- Berechnung aus der Reichweite des Teilchens<sup>a</sup>

Notizen zur Bestimmung der z-Koordinaten:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen z.B. zu den Abständen  $d_R$  und  $d_P$  für die drei Punkte anfertigen.

<sup>a</sup>Diese Methode ist für die markierten Spuren nicht geeignet. Die Spuren sind wahrscheinlich nicht vollständig abgebildet, weil die Teilchen die Blaskammer verlassen. Die Endpunkte der Spuren haben als z-Koordinaten beinahe 0 cm bzw. 50,5 cm, was der Ober- bzw. Unterseite der Blaskammer entspricht.

---

 Lösungsblatt
 

---

Notizen zur Impulsberechnung:

An dieser Stelle kann der Lernende selbstständig Notizen anfertigen, z.B.:

z-Koordinate des Vertex:  $z_V = 28,89 \text{ cm}$

blau markierte Spur

grün markierte Spur

$$z_{\text{Ende}} = 0,79 \text{ cm}$$

$$z_{\text{Ende}} = 50,50 \text{ cm}$$

$$l_s = 40,82 \text{ cm}$$

$$l_s = 43,80 \text{ cm}$$

$$d_{ss} = 1,53 \text{ cm}$$

$$d_{ss} = 1,72 \text{ cm}$$

$$r = 136,90 \text{ cm}$$

$$r = 140,28 \text{ cm}$$

Notiere deine Ergebnisse hier.

$$p_1 = (715 \pm 72) \frac{\text{MeV}^b}{c}$$

$$p_2 = (732 \pm 73) \frac{\text{MeV}^b}{c}$$

### 3. Aufgabe - Bestimmung des Impulses des neutralen Teilchens

Bei der Wechselwirkung von Teilchen gilt der Impulserhaltungssatz. Um mit Hilfe dieses Satzes den Impuls des neutralen Teilchens bestimmen zu können, müssen die Richtungen ermittelt werden, in denen sich die beiden Teilchen vom Vertex entfernen.

Ermittle den Impuls des neutralen Teilchens.

$$p = 23051 \frac{\text{MeV}^c}{c}$$

---

<sup>b</sup>Das digitale Arbeitsblatt lässt die angegebene Spannweite an Werten zu.

<sup>c</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Im digitalen Arbeitsblatt wird entsprechend der Eingaben des Lernenden Feedback gegeben.

#### 4. Aufgabe - Überprüfung der Hypothesen mit dem Energieerhaltungssatz

Mithilfe des Energieerhaltungssatzes lassen sich nun die Umwandlungshypothesen testen. Berechne die Differenz  $\Delta E$  der Energien vor der Umwandlung und nach der Umwandlung für beide Hypothesen mittels der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung.

Führe die Berechnungen für beide Hypothesen durch und runde die Ergebnisse auf ganze Zahlen.

$$E_{\text{vorher}} = E_{P_1} + E_{P_2} \stackrel{\text{d}}{=} \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (24000 \text{ MeV})^2} + \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (0 \text{ MeV})^2}$$

$$= 24956 \text{ MeV}$$

**Hypothese 1:**  $p \ p \rightarrow p \ p \ \pi^0$

$$E_{\text{nachher}} = E_{p_1} + E_{p_2} + E_{\pi^0}$$

$$= \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (715 \text{ MeV})^2} + \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (732 \text{ MeV})^2}$$

$$+ \sqrt{(135 \text{ MeV})^2 + (23051 \text{ MeV})^2}$$

$$= 25421 \text{ MeV}^{\text{e}}$$

$$|\Delta E| = |E_{\text{nachher}} - E_{\text{vorher}}|$$

$$= 465 \text{ MeV}^{\text{e}}$$

<sup>d</sup>Das Strahlproton  $P_1$  besitzt einen Einfallsimpuls von 24000 MeV. Das Proton des Wasserstoffs  $P_2$  ruht.

<sup>e</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Im digitalen Arbeitsblatt wird entsprechend der Eingaben des Lernenden Feedback gegeben.

**Hypothese 2:**  $p \ p \rightarrow p \ n \ \pi^+$

$$E_{nachher} = E_p + E_{\pi^+} + E_n$$

$$= \sqrt{(938 \text{ MeV})^2 + (715 \text{ MeV})^2} + \sqrt{(140 \text{ MeV})^2 + (732 \text{ MeV})^2} \\ + \sqrt{(940 \text{ MeV})^2 + (23051 \text{ MeV})^2}$$

$$= 24995 \text{ MeV}^f$$

$$|\Delta E| = |E_{nachher} - E_{vorher}|$$

$$= 39 \text{ MeV}^f$$

### 5. Aufgabe - Entscheidung für eine Umwandlungshypothese

Entscheide auf Grundlage deiner Berechnungen, welches neutrale Teilchen entstanden ist.

- Neutron  
 neutrales Pion

Begründe deine Entscheidung.

Die Berechnung zeigt, dass für die Hypothese, dass ein Neutron entstanden ist, die Energien, welche sich aus den gemessenen Impulsen ergeben, vor und nach der Umwandlung besser übereinstimmen.

<sup>f</sup>Der Wert der Lernenden kann an dieser Stelle abweichen, je nachdem welche Werte vorangegangen sind. Außerdem können das Proton und das Pion auch der jeweils anderen Spur zugeordnet werden. Dann ergeben sich:  $E_{nachher} = 24989 \text{ MeV}$  und  $|\Delta E| = 33 \text{ MeV}$ . Das digitale Arbeitsblatt lässt beide Möglichkeiten zu und beachtet die vorangegangenen Eingaben.

# G Zusatzmaterialien

## G.1 Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften

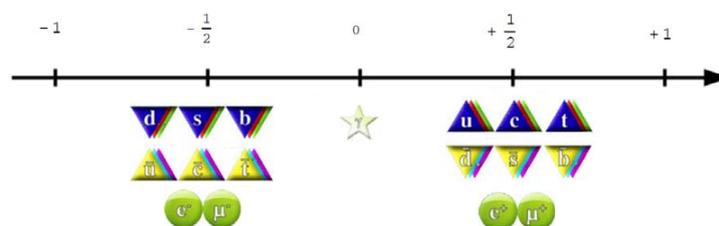
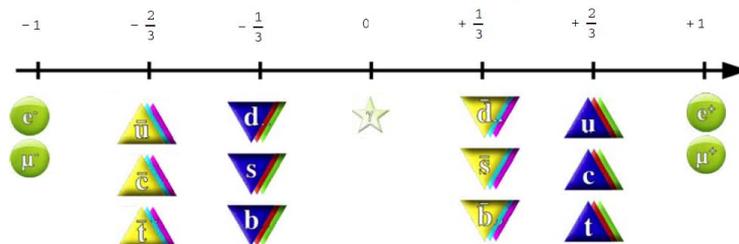
Bei der Auswertung von Blasenkammeraufnahmen ist es hilfreich, einige charakteristische Eigenschaften von Teilchen zu kennen. Dazu gehören:

- die (Ruhe-)Masse  $m$ ,
- die elektrische Ladungszahl  $q$ ,
- die schwache Ladungszahl  $I$  und
- die Strangeness  $S$ .

Stelle diese Eigenschaften für die vorgegebenen Teilchen in den Tabellen zusammen.

#### Hinweise:

- Recherchiere die Masse der Teilchen mithilfe des Internets. Notiere die Masse in der Einheit  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$  und runde das Ergebnis auf eine ganze Zahl (Ausnahme: Runde die Masse des Elektrons und des Positrons auf eine Nachkommastelle).
- Bei zusammengesetzten Teilchen ergibt sich die elektrische und schwache Ladungszahl aus der Summe der entsprechenden Ladungszahlen der einzelnen Quarks. Nutze folgende Abbildungen als Hilfestellung:



- Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

<sup>a</sup>Quelle: verändert nach Netzwerk Teilchenwelt: *Schulmaterialien zur Teilchenphysik - Wechselwirkungen und Teilchen*, Hrsg. von Joachim Herz Stiftung, In Vorbereitung, 2015.

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

**Ausgewählte Elementarteilchen**

Name des Teilchens	Symbol	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$
Photon	$\gamma$			
Elektron	$e^-$			
Positron	$e^+$			
Myon	$\mu^-$			
Anti-Myon	$\mu^+$			

**Zusammengesetzte Teilchen**

Name des Teilchens	Symbol	Quarkzusammensetzung	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$	$S$
Proton	$p$	$uud$				
Neutron	$n$	$udd$				
Lamda	$\Lambda^0$	$uds$				
neutrales Pion	$\pi^0$	Mischung von $u\bar{u}$ und $d\bar{d}$				
positives Pion	$\pi^+$	$u\bar{d}$				
negatives Pion	$\pi^-$	$d\bar{u}$				
neutrales Kaon	$K^0$	$d\bar{s}$				
neutrales Anti-Kaon	$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$				
positives Kaon	$K^+$	$u\bar{s}$				
negatives Kaon	$K^-$	$\bar{u}s$				

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Liste der Teilchen und ihrer Eigenschaften

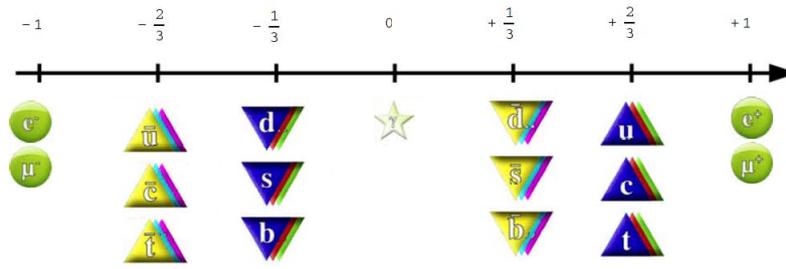
Bei der Auswertung von Blasenkammeraufnahmen ist es hilfreich, einige charakteristische Eigenschaften von Teilchen zu kennen. Dazu gehören:

- die (Ruhe-)Masse  $m$ ,
- die elektrische Ladungszahl  $q$ ,
- die schwache Ladungszahl  $I$  und
- die Strangeness  $S$ .

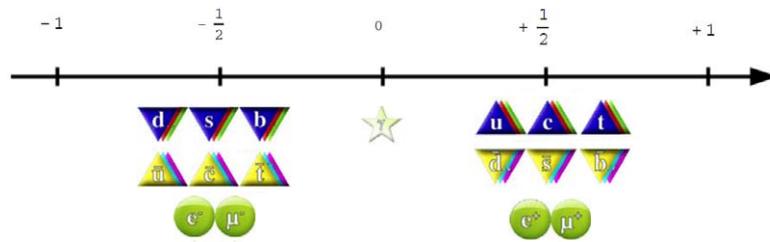
Stelle diese Eigenschaften für die vorgebenen Teilchen in der Tabelle zusammen.

**Hinweise:**

- Recherchiere die Masse der Teilchen mithilfe des Internets. Notiere die Masse in der Einheit  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$  und runde das Ergebnis auf eine ganze Zahl (Ausnahme: Runde die Masse des Elektrons und des Positrons auf eine Nachkommastelle).
- Bei zusammengesetzten Teilchen ergibt sich die elektrische und schwache Ladungszahl aus der Summe der entsprechenden Ladungszahlen der einzelnen Quarks. Nutze folgende Abbildungen als Hilfestellung:



Elektrische Ladungszahlen einiger Elementarteilchen<sup>a</sup>



Schwache Ladungszahlen einiger Elementarteilchen<sup>a</sup>

- Jedes Strange-Quark liefert einen Beitrag von  $-1$  und jedes Anti-Strange-Quark einen Beitrag von  $+1$  zur Strangeness.

<sup>a</sup>Quelle: verändert nach Netzwerk Teilchenwelt: *Schulmaterialien zur Teilchenphysik - Wechselwirkungen und Teilchen*, Hrsg. von Joachim Herz Stiftung, In Vorbereitung, 2015.

Name:

Datum:

**Ausgewählte Elementarteilchen**

Name des Teilchens	Symbol	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$
Photon	$\gamma$	0	0	0
Elektron	$e^-$	0,5	-1	$-\frac{1}{2}$
Positron	$e^+$	0,5	+1	$+\frac{1}{2}$
Myon	$\mu^-$	106	-1	$-\frac{1}{2}$
Anti-Myon	$\mu^+$	106	+1	$+\frac{1}{2}$

**Zusammengesetzte Teilchen**

Name des Teilchens	Symbol	Quarkzusammensetzung	$m$ in $\frac{\text{MeV}}{c^2}$	$q$	$I$	$S$
Proton	$p$	$uud$	938	+1	$+\frac{1}{2}$	0
Neutron	$n$	$udd$	940	0	$-\frac{1}{2}$	0
Lamda	$\Lambda^0$	$uds$	1116	0	$-\frac{1}{2}$	-1
neutrales Pion	$\pi^0$	Mischung von $u\bar{u}$ und $d\bar{d}$	135	0	0	0
positives Pion	$\pi^+$	$u\bar{d}$	140	+1	+1	0
negatives Pion	$\pi^-$	$d\bar{u}$	140	-1	-1	0
neutrales Kaon	$K^0$	$d\bar{s}$	498	0	0	+1
neutrales Anti-Kaon	$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$	498	0	0	-1
positives Kaon	$K^+$	$u\bar{s}$	494	+1	+1	+1
negatives Kaon	$K^-$	$\bar{u}s$	494	-1	-1	-1

## G.2 Zusammenfassung der Methoden der Impulsberechnung

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

### Vorgehen bei der Impulsberechnung

	aus der Krümmung der Spur	aus der Reichweite des Teilchens
Schritt 1	<b>Bestimmung der z-Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt der Spur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• View 1 anzeigen und so auf die Blasenkameraaufnahme (View 2) verschieben, dass zwei gleiche Vorderseitenkreuze übereinander liegen</li> <li>• Abstände messen: <ul style="list-style-type: none"> <li>– <math>d_R</math> zwischen zwei gleichen Rückseitenkreuzen,</li> <li>– <math>d_A</math> zwischen den beiden Anfangspunkten,</li> <li>– <math>d_E</math> zwischen den beiden Endpunkten.</li> </ul> </li> <li>• z-Koordinaten berechnen: <math display="block">z_P = 50,5 \text{ cm} \cdot \frac{d_P}{d_R}</math>           (<math>P</math> ist zu ersetzen durch <math>A</math> bzw. <math>E</math>.) </li> </ul>	
		<b>Berechnung der Tiefe eines weiteren Spurpunktes <math>SP</math></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge der Spur <math>l_{ges}</math> und Länge <math>l</math> zwischen Anfangspunkt und Spurpunkt <math>SP</math> messen (in View 2)</li> <li>• z-Koordinate berechnen: <math display="block">z_{SP} = z_A + \frac{l}{l_{ges}}(z_E - z_A)</math> </li> </ul>
Schritt 2	<b>Bestimmung des Krümmungsradius</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge der Sehne <math>l_s</math> zwischen Anfangs- und Endpunkt der Spur dreidimensional messen</li> <li>• Abstand <math>d_{ss}</math> zwischen Spur und Mitte der Sehne in View 2 messen</li> <li>• Radius berechnen: <math display="block">r = \frac{l_s^2}{8d_{ss}} + \frac{d_{ss}}{2}</math> </li> </ul>	<b>Bestimmung der dreidimensionalen Spurlänge</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Länge der Spur dreidimensional messen</li> </ul>

Name: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Schritt 3	<b>Berechnung des Impulses</b>  $p = 0,3 \cdot B \cdot r$ (Werden der Radius $r$ in Meter und die Magnetfeldstärke $B$ in Tesla eingesetzt, erhält man als Einheit für den Impuls $\frac{\text{GeV}}{c}$ .)	<b>Bestimmung des Impulses aus der Reichweite</b>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Impuls-Reichweite-Beziehung nutzen und zugehörigen Impuls ablesen</li> </ul>
-----------	--	--

### Allgemeine Informationen zu den Blaskammeraufnahmen

- Das Magnetfeld in der Blaskammer besitzt eine Stärke von 1,74 T und zeigt aus der Bildebene heraus.
- Die Strahlprotonen besitzen einen Eingangsimpuls von  $24 \frac{\text{GeV}}{c}$ . Sie durchqueren die Aufnahmen von unten nach oben.
- Der Maßstab GeoGebra-Einheiten : cm beträgt 1 : 1.

## **Erklärung**

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

Floria Naumann

Dresden, 10. September 2015