

Handbuch zur Software

Aktualisierter Auszug aus der Examensarbeit:
„Erstellung eines computergestützten Versuchs des physikalischen
Fortgeschrittenenpraktikums zur Auswertung von Blasenkammeraufnahmen.“
Christian Helzel,
Bonn 2002

Christian Helzel

Bonn 2003

Inhaltsverzeichnis

1	Software.....	1
1.1	Allgemeines.....	1
1.2	Installation.....	1
1.2.1	Bereitstellung auf einem Server	2
1.2.2	Nutzung über das Internet	2
1.2.3	Lokale Installation.....	2
1.2.4	Bilddateien	5
1.2.5	Bildliste	5
1.3	Einstellungen beim Aufruf	6
2	Bedienung.....	9
2.1	Aufbau der Anwendung	9
2.1.1	Menüleiste	10
2.1.2	Statusleiste.....	11
2.1.3	Bildliste	11
2.1.4	Arbeitsbereich	11
2.1.5	Datenbereich.....	18
2.1.6	Splitter	21
2.2	Blasenkammeraufnahmen	21
2.2.1	Auswählen	22
2.2.2	Manipulieren	23
2.2.3	Bildausschnitt	25
2.3	Beschreibung der Messobjekte.....	25
2.3.1	 Particle.....	27
2.3.2	 Distance	28
2.3.3	 Circle	30
2.3.4	 Ruler	31
2.3.5	 Track.....	32
2.3.6	 Interaction.....	36
2.3.7	 Vzero - V^0	41
2.4	Datensicherung.....	47
3	Auswertung.....	48
3.1	Mathematik.....	48
3.1.1	Vergrößerung	48
3.1.2	Tiefenbestimmung.....	49
3.1.3	Krümmungsmessung	52
3.2	Spurlänge.....	56
3.3	Wirkungsquerschnitt	59
3.4	Multiplizität.....	60
3.4.1	Mittlere geladene Multiplizität.....	60
3.4.2	Mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen	60
3.5	Impuls.....	62
3.5.1	Impuls aus der Krümmung	62
3.5.2	Impuls aus der Reichweite	63
3.6	Ladungsvorzeichen.....	68

A	Anhang	69
A.1	Glossar.....	69
A.2	Screenshots.....	70
A.3	Bezugsmarken	73
Quellenverzeichnis		i
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis		iii
Indexverzeichnis		v

1 Software

1.1 Allgemeines

Die Software ist in *Java* programmiert und basiert auf der Version 1.3.1, d.h. sie sollte auch mit allen neueren Versionen verträglich sein – für die Versionen bis einschließlich 1.4.2 hat sich dies bestätigt.

Das Programm wurde unter *Windows 2000/XP* entwickelt und getestet, insbesondere wurde das Zusammenspiel mit den Browsern *Internet Explorer*¹, *Mozilla*², *Netscape*³ und *Opera*⁴ in derzeit aktuellen Versionen erfolgreich überprüft. Die folgende Beschreibung orientiert sich am Einsatz der Software unter *Windows* bzw. mit den aufgeführten Browsern.

Prinzipiell sollte die Verwendung der Software nicht nur unter *Windows*, sondern auch unter jedem anderen Betriebssystem mit grafischer Benutzeroberfläche möglich sein, für das *Java* ab der Version 1.3.1 zur Verfügung steht. Für *Linux* verliefen entsprechende Tests erfolgreich.

Während das Programm in Punkto Betriebssystem, Browser und *Java* recht anspruchslos ist, trifft dies auf den Bereich Hardware nicht zu. Selbst für einfache Tests bedarf es mindestens eines 500 MHz Prozessors und 192 MB RAM. Um mit der Software jedoch effektiv arbeiten zu können, sollte es sich wenigstens um einen 1,5 – 2,5 GHz Prozessor und 768 MB RAM handeln. Die Benutzung einer Kombination aus Grafikkarte und Bildschirm, die in der Lage sind bei einer Auflösung von 1280x1024 Pixel ein flimmerfreies Bild bei 85 Hz zu liefern, scheint angemessen. Bei der Grafikkarte sollte ein Modell mit ausgezeichneten 2D-Eigenschaften einem Modell mit 3D-Unterstützung vorgezogen werden. Besonders nützlich wäre eine Grafikkarte mit Anschlussmöglichkeit für einen zweiten Monitor, da hierdurch das Anzeigen der Blasenkammeraufnahmen auf einem separaten Bildschirm möglich wird. Als Monitor bietet sich ein TFT-Display an. Dies gilt insbesondere für einen möglichen zweiten Bildschirm, den man besser ausnutzen kann, falls er sich vertikal verwenden lässt. Die Festplatte sollte entsprechend der zu erwartenden Anzahl von Blasenkammeraufnahmen dimensioniert sein. Für jedes Bild einer Ansicht sollte mit einer Größe von circa 15 MB gerechnet werden. Bei drei Ansichten pro Aufnahme ergibt dies einen Platzbedarf von etwa 75 MB. Für 1.000 Aufnahmen braucht man also eine Festplatte mit einem Fassungsvermögen in der Größenordnung von 75 GB.

1.2 Installation

Auf welche Art die Software installiert wird, hängt stark davon ab, in welcher Form sie eingesetzt werden soll. Es besteht einerseits die Möglichkeit die Software auf einem WWW-Server zu installieren und so die Nutzung über das Internet zu ermöglichen. Andererseits kann man die Software auch zur lokalen Nutzung auf dem Computer zu installieren.

¹ Siehe [29].

² Siehe [26].

³ Siehe [27].

⁴ Siehe [28].

1.2.1 Bereitstellung auf einem Server

Zur Bereitstellung im Internet braucht man lediglich den Inhalt der CD in ein Verzeichnis auf der Festplatte zu kopieren, welches dann über den WWW-Server freigegeben wird. Der Server sollte so eingerichtet sein, dass die Datei „index.html“ bei Zugriffen auf das Verzeichnis als Startseite benutzt wird.

1.2.2 Nutzung über das Internet

Um die Software über das Internet nutzen zu können, bedarf es eines Browsers mit Java-Unterstützung für die Version 1.3.1 oder neuer. Bei allen gängigen Browsern ist dies gewährleistet, sofern man bei deren Installation nicht bewusst auf die *Java*-Unterstützung verzichtet hat.

Informationen zur nachträglichen Installation der *Java*-Unterstützung, sowie zur Steigerung der Performance, finden sich im Abschnitt zur lokalen Installation weiter unten. Installationsversionen verschiedener Browser befinden sich auf der CD im Verzeichnis „\downloads\browser“.

Von der Startseite aus gelangt man über den Punkt „Applet“ zur Software. Bei Verwendung des Offline-Links werden die lokal vorliegenden Blasenkammeraufnahmen verwendet, während beim Online-Link die entsprechenden Aufnahmen per Internet von der Universität Bonn bezogen werden. Die zweite Variante sollte nur bei Einsatz einer sehr schnellen Internetverbindung verwendet werden.

WICHTIG: Das Applet wird in einem eigenen Fenster ausgeführt. Zusätzlich zum Applet-Fenster öffnet sich ein neues Browser-Fenster, das durch seinen roten Hintergrund auf sich aufmerksam macht. Dieses Fenster darf nicht geschlossen werden solange das Applet verwendet wird, da mit diesem Fenster ohne weitere Sicherheitsabfrage auch das Applet unwiderruflich beendet wird und alle darin gesammelten Daten verloren gehen.

1.2.3 Lokale Installation

Bei der lokalen Nutzung der Software kann diese nicht nur als Applet im Browser ausgeführt werden, sondern auch als eigenständige Anwendung (Application). Das Vorgehen für beide Möglichkeiten wird im Folgenden beschrieben. Es spielt in beiden Fällen keine Rolle, ob die Software von der CD aus gestartet wird, oder der Inhalt der CD zuvor auf die Festplatte kopiert und von dort aus gestartet wird.

Application

Zum Ausführen der Software als eigenständige Anwendung wird das *Java Runtime Environment*⁵ (JRE) in der Version 1.3.1 oder neuer benötigt. Es empfiehlt sich die Nutzung einer Version ab 1.4.0, da seit dieser Version die Hardwarebeschleunigung für Grafikoperationen unterstützt wird, was sich deutlich positiv auf die Performance der Software auswirkt. Angaben zur Nutzung der Hardwarebeschleunigung finden sich im Abschnitt „Performance“.

⁵ Siehe [17].

Das JRE in der jeweils neusten Version ist als selbsterklärende Installation auf den Internetseiten der Firma *Sun Microsystems* erhältlich. Außerdem befindet sich eine Version des JRE auf der CD im Verzeichnis „\downloads\java\“.

Anmerkung: Bei Nutzung der neusten Java-Versionen kann es nötig werden Updates am Betriebssystem vorzunehmen. So hat z.B. die Version 1.4.1_01 bei Tests unter *Windows2000* Probleme bereitet, die sich nur durch Installation des *Service Pack 3* für *Windows2000* beheben ließen.

Nach der Installation muss das „bin“ Verzeichnis der JRE in die Umgebungsvariable „PATH“ eingefügt werden.

Beispiel: Bei Installation des JRE 1.4.0 in das Verzeichnis „C:\Programme\Java“ ist dem „PATH“ das Verzeichnis „C:\Programme\Java\j2re1.4.0\bin“ hinzuzufügen. Weitergehende Informationen zur Anpassung von Umgebungsvariablen finden sich in der Hilfe zu *Windows*.

Die Anwendung kann nach Installation des JRE direkt von der CD aus gestartet werden, indem man die Datei „__start.cmd“ im Hauptverzeichnis ausführt oder in der Eingabeaufforderung in das Unterverzeichnis „applet“ wechselt und hier folgenden Befehl, ohne die Zeilennummer, ausführt:

```
1: javaw -Xincgc -Xms128m -Xmx256m -jar BubbleChamber.jar  
-Dsun.java2d.ddscale=true -image_url=BubbleChamber/images/  
-image_list=BubbleChamber/images/ImageSets.lst  
-continuous_layout=true -reports_path=Reports -  
sessions_path=Sessions
```

Anmerkung: Im Abschnitt „Performance“, weiter unten, sind einige Einstellungsmöglichkeiten beschrieben mit deren Hilfe sich die Geschwindigkeit des Programms in Abhängigkeit von der verwendeten Hardware beeinflussen lässt.

Applet

Um die Software als Applet ausführen zu können, benötigt man einen Browser mit Java-Unterstützung für die Version 1.3.1 oder neuer. Bei allen gängigen Browsern ist dies gewährleistet, sofern man bei deren Installation nicht bewusst auf die *Java*-Unterstützung verzichtet hat.

Informationen zur nachträglichen Installation der Java-Unterstützung finden sich weiter oben im Abschnitt „Application“. Hinweise zur Steigerung der Performance finden sich im Abschnitt „Performance“, weiter unten.

Für die Nutzung des JRE ab 1.4.0 muss die Plug-in-Funktionalität für den Browser aktiviert beziehungsweise der Browser von Hand für die Nutzung des Plug-in konfiguriert werden. Weitere Informationen hierzu sind der Dokumentation des Browsers zu entnehmen.

Von der Startseite „index.html“ im Hauptverzeichnis der CD gelangt man über den Punkt „Applet“ zur Software. Ansonsten gelten für die Ausführung als Applet die weiter oben, im Abschnitt „Nutzung über das Internet“ beschriebenen Bedingungen.

Performance

Bei Verwendung der Software als Applet zusammen mit dem *Java Plug-in* lässt sich durch Veränderung einiger Einstellungen die Performance sichtlich verbessern. Die Einstellungen werden an der *Java Virtual Machine* (VM), die das Programm interpretiert und ausführt, vorgenommen. Das Ändern der Einstellungen kann unter *Windows* in der Systemsteuerung über den Punkt *Java Plug-in* durchgeführt werden. Die Eintragungen erfolgen in der Eingabezeile „Java-Laufzeitparameter“.



Abbildung 1: Konfiguration des *Java Plug-in*

Parameter	Erläuterung
-Xincgc	Aktiviert die inkrementelle Garbage-Collection, was bei ausreichendem Hauptspeicher (RAM) zu einer höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit führen kann.
-Xms128m	Legt die Untergrenze für die von Java benutzbare Menge an Hauptspeicher auf 128 MB fest. Anstatt 128 kann ein anderer, möglichst höherer, Wert angegeben werden. Der Wert sollte die Menge an frei verfügbarem RAM nicht überschreiten, da ansonsten auf die Festplatte ausgelagert wird, was sich negativ auf die Geschwindigkeit auswirkt.
-Xmx512m	Legt die Obergrenze für die von Java benutzbare Menge an Hauptspeicher auf 512 MB fest. Die Voreinstellung für diesen Wert beträgt 64 MB, was in der Regel nicht ausreichen wird, da die Bearbeitung und das Anzeigen der Blasenkammeraufnahmen sehr speicherintensiv ist. Der Wert darf nicht kleiner sein, als der bei -Xms angegebene. Im übrigen gilt auch hier, dass der Wert die Menge an frei verfügbarem RAM nicht überschreiten sollte.
-Dsun.java2d.ddscale=true	Diese Option aktiviert die Nutzung der Hardwarebeschleunigung für die Grafikbearbeitung. Der Parameter kann ab <i>Java</i> 1.4.0 verwendet werden, bei der Version 1.3.1 zeigt er noch keine Wirkung, stört aber auch nicht.

Tabelle 1: Parameter für die Virtual Machine

Zum Ausschalten einzelner Parameter können diese einfach weggelassen werden. Weiterreichende Informationen zu den aufgeführten Parametern findet man in der Dokumentation zu den *Java Tools* und auf der Internetseite der Firma *Sun Microsystems*⁶.

Anmerkung: Die oben beschriebenen Einstellungen können auch bei Ausführung als Eigenständige Anwendung vorgenommen werden, indem man entweder den bereits im Abschnitt „Application“ beschriebenen Aufruf des Programms oder die Dateien „_start.Jar.cmd“ bzw. „_start.Class.cmd“ entsprechend anpasst.

1.2.4 Bilddateien

Sofern beim Start keine anderweitigen Angaben gemacht werden, erwartet die Software die Dateien mit den Blasenkammeraufnahmen in den Verzeichnissen „view1“, „view2“ und „view3“ unterhalb des Verzeichnisses „BubbleChamber\images\“ vorzufinden. Es wird das GIF-Format für die digitalisierten Aufnahmen verwendet und dementsprechend die Dateierendung „.gif“ vorausgesetzt. Bei Verwendung eines Betriebssystems, welches bei Dateinamen zwischen Groß- und Kleinschreibung unterscheidet, wie z.B. *Linux*, muss darauf geachtet werden, die Dateierendungen der Bilddateien klein zu schreiben. Zu den drei verschiedenen Ansichten pro Aufnahme werden die Bilddateien auf die entsprechenden Verzeichnisse verteilt, wobei die Dateinamen der einzelnen Bilder jeweils gleich sind. Für eine Aufnahme „a“ ist also in jedem der drei Verzeichnisse eine Datei „a.gif“ zu finden, die das digitalisierte Bild aus der entsprechenden Ansicht enthält.

1.2.5 Bildliste

Die Bildliste ist eine Datei, in der die Namen aller Blasenkammeraufnahmen angegeben sind, die mit der Software bearbeitet werden sollen. Es handelt sich dabei um eine einfache Textdatei, die in jeder Zeile den Namen jeweils einer Aufnahme enthält. Die Namen werden ohne Dateierendung angegeben. Da die Namen der Dateien für die drei Ansichten jeder Aufnahme gleich sind, wird nur ein Eintrag vorgenommen. Für die Dateien „view1\ a.gif“, „view2\ a.gif“ und „view3\ a.gif“ wird also nur ein Eintrag „a“ angelegt. Bei Verwendung eines Betriebssystems, welches bei Dateinamen zwischen Groß- und Kleinschreibung unterscheidet, wie z.B. *Linux*, muss darauf geachtet werden, die Namen der Bilder in derselben Schreibweise anzugeben, wie sie auch beim Dateinamen vorliegt.

1:	2401_710
2:	2402_710
3:	2403_710
4:	2404_710
5:	2405_710
6:	2406_710
7:	2407_710
8:	2409_710
9:	2410_710

⁶ Siehe [13].

1.3 Einstellungen beim Aufruf

Schon beim Starten der Software stellt man die Weichen für die Art der späteren Verwendung. Folgende Einstellungen sind möglich:

Parameter	Kürzel	Wert	Erläuterung
Image_URL	U	Pfad	Der Pfad gibt an, wo die Software die Bildverzeichnissen „view1“, „view2“ und „view3“ findet. Es kann sich hierbei um einen relativen Verweis auf ein Unterverzeichnis (z.B. „BubbleChamber/images/“), oder um einen Verweis auf eine Internetadresse (z.B. „http://physik.uni-bonn.de/BubbleChamber/images/“) handeln.
Image_List	L	Dateiname	Unter dem angegebenen Dateinamen sucht die Software nach einer Liste von Blasenkammeraufnahmen. Der Dateinamen darf dabei einen relativen Verweis auf ein Unterverzeichnis enthalten, oder in Form eine vollständigen URL angegeben werden. Die Liste wird für den Auswahldialog bzw. das automatische Erstellen der Karteikarten verwendet.
Reports_Path	RP	Pfad	Bei „Save Report“ ⁷ wird das hier eingetragene Verzeichnis als Standard verwendet.
Report_XSL_URL	RX	Dateiname	Das hier eingetragene XSL-Skript wandelt beim Speichern eines Reports die eigentliche XML-Datei in eine HTML-Datei um. Dieser Parameter ermöglicht die Verwendung einer eigenen Skript-Datei zur Erzeugung von individuellen Reports.
Sessions_Path	SP	Pfad	Bei „Load Session“ ⁷ und „Save Session“ wird das hier eingetragene Verzeichnis als Standard verwendet.
Session_File	SF	Dateiname	Beim Programmstart werden die in dieser Datei abgelegten Einstellungen wieder hergestellt.

⁷ Siehe Abschnitt „Menüleiste“ auf Seite 10.

Parameter	Kürzel	Wert	Erläuterung
PreLoad_ImageSets	P	true / false	Diese Einstellung ermöglicht das automatische Erstellen von Karteikarten zur Bearbeitung aller vorgegebenen Blasenkammeraufnahmen.
Continuous_Layout	C	true / false	Mit diesem Parameter kann das Verhalten der sogenannten Splitter ⁸ (Bedienelemente zum Ändern der Größe von Bereichen) im Programm verändert werden. Normalerweise verändert sich die Größe der betroffenen Bildschirmelemente unmittelbar beim Verschieben der Splitter mit der Maus. Bei dieser Einstellung jedoch verändern sich die Größen erst beim Loslassen der Maustaste. Dies kann auf langsameren Computer unerwünschtes Flackern und Verzögerungen verhindern.
Scaling	S	Zahl	Dieser Parameter wird nur benötigt, falls sich die Auflösung der Bilddaten ändert. Er gibt den Faktor zur Umrechnung von Pixel nach Zentimeter an.
Scaling_Delta	SD	Zahl	Bei Verwendung des Scaling-Parameters, kann über diesen Parameter ein neuer Wert für den absoluten Fehler der Umrechnung von Pixel nach Zentimeter angegeben werden.
Default_Clip	DC	Breite:Höhe	Über dieses Wertepaar wird die Größe des Bildausschnittes angegeben, der im Programm angezeigt wird. Sind die Dimensionen kleiner als die der Bilddateien werden die Bilddaten abgeschnitten. Sind die Bilddateien kleiner, dann wird rechts und unten ein weißer Rand hinzugefügt.
ImageSet_Dim	ID	Breite:Höhe	Mit diesen beiden Werten wird die Anfangsgröße des Image-Select-Dialogs ⁹ angegeben.
ImageSet_Pos	IP	x:y	Die Angabe dieser Werte definiert die anfängliche Position der linken oberen Ecke des Image-Select-Dialogs.
Workspace_Dim	WD	Breite:Höhe	Mit diesen beiden Werten wird die Anfangsgröße des Workspace-Fensters ¹⁰ angegeben.
Workspace_Pos	WP	x:y	Die Angabe dieser Werte definiert die anfängliche Position der linken oberen Ecke des Workspace-Fensters.
Workspace_3D_Dim	W3D	Breite:Höhe	Mit diesen beiden Werten wird die Anfangsgröße des Workspace3D-Fensters ¹⁰ angegeben.
Workspace_3D_Pos	W3P	x:y	Die Angabe dieser Werte definiert die anfängliche Position der linken oberen Ecke des Workspace3D-Fensters.

⁸ Näheres zur Verwendung von Splittern findet sich im Abschnitt „Splitter“ auf Seite 21.

⁹ Siehe Abschnitt „Image-Select-Dialog“ auf Seite 22.

¹⁰ Siehe Abschnitt „Workspace“ auf Seite 15.

Parameter	Kürzel	Wert	Erläuterung
BeamProfile_Dim	BD	Breite:Höhe	Mit diesen beiden Werten wird die Anfangsgröße des BeamProfile-Fensters ¹¹ angegeben.
BeamProfile_Pos	BP	x:y	Die Angabe dieser Werte definiert die anfängliche Position der linken oberen Ecke des BeamProfile-Fensters.
Momentum_Dim	MD	Breite:Höhe	Mit diesen beiden Werten wird die Anfangsgröße der Momentum-Fenster ¹¹ angegeben.
Momentum_Pos	MP	x:y	Die Angabe dieser Werte definiert die anfängliche Position der linken oberen Ecke der Momentum-Fenster.

Tabelle 2: Mögliche Parameter beim Aufruf der Software

Bei den Parametern kommt es nicht auf die Groß- / Kleinschreibung an. Lediglich für Dateinamen und Pfadangaben kann diese, abhängig vom Betriebssystem, z.B. bei *Linux*, relevant werden. Weitergehende Informationen zur Übergabe von Parameter-Werte-Paaren an Applets finden sich in HTML-Handbüchern¹². Bei Verwendung der Software als Application werden die Parameter beim Aufruf mit übergeben. Dem Parameter wird hierzu ein „-“ vorangestellt und der Wert folgt durch ein „=“ getrennt. Z.B. „-Image_URL=BubbleChamber/images/“ bzw. „-U=BubbleChamber/images/“.

¹¹ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19.

¹² Siehe [14].

2 Bedienung

Im Folgenden wird die Bedienung der Software erklärt und dabei der Bezug zu den einzelnen Versuchsaufgaben hergestellt. Die zur Verdeutlichung eingefügten Screenshots wurden unter Verwendung des JRE 1.4.0 für *Windows* erstellt. Das Erscheinungsbild unter Verwendung eines anderen JRE, insbesondere der Versionen für *Linux*, kann sich im Detail von dem hier vorgestellten unterscheiden, der prinzipielle Aufbau wird sich dabei jedoch nicht ändern.

In Rücksichtnahme auf die internationale Auslegung des Studiengangs Physik sind alle Beschriftungen im Programm in Englisch gehalten.

2.1 Aufbau der Anwendung

Das Fenster der Anwendung passt sich beim Start an die Bildschirmgröße an – es wird ein-gangs der gesamte verfügbare Platz, abgesehen von einem freien Streifen am unteren Rand, der für die Taskleiste reserviert ist, genutzt. Die Größe des Fensters ist dadurch aber nicht festgelegt sondern kann jederzeit vom Benutzer verändert werden, wobei es ihm auch mög-lich ist das Fenster zu minimieren bzw. zu maximieren.

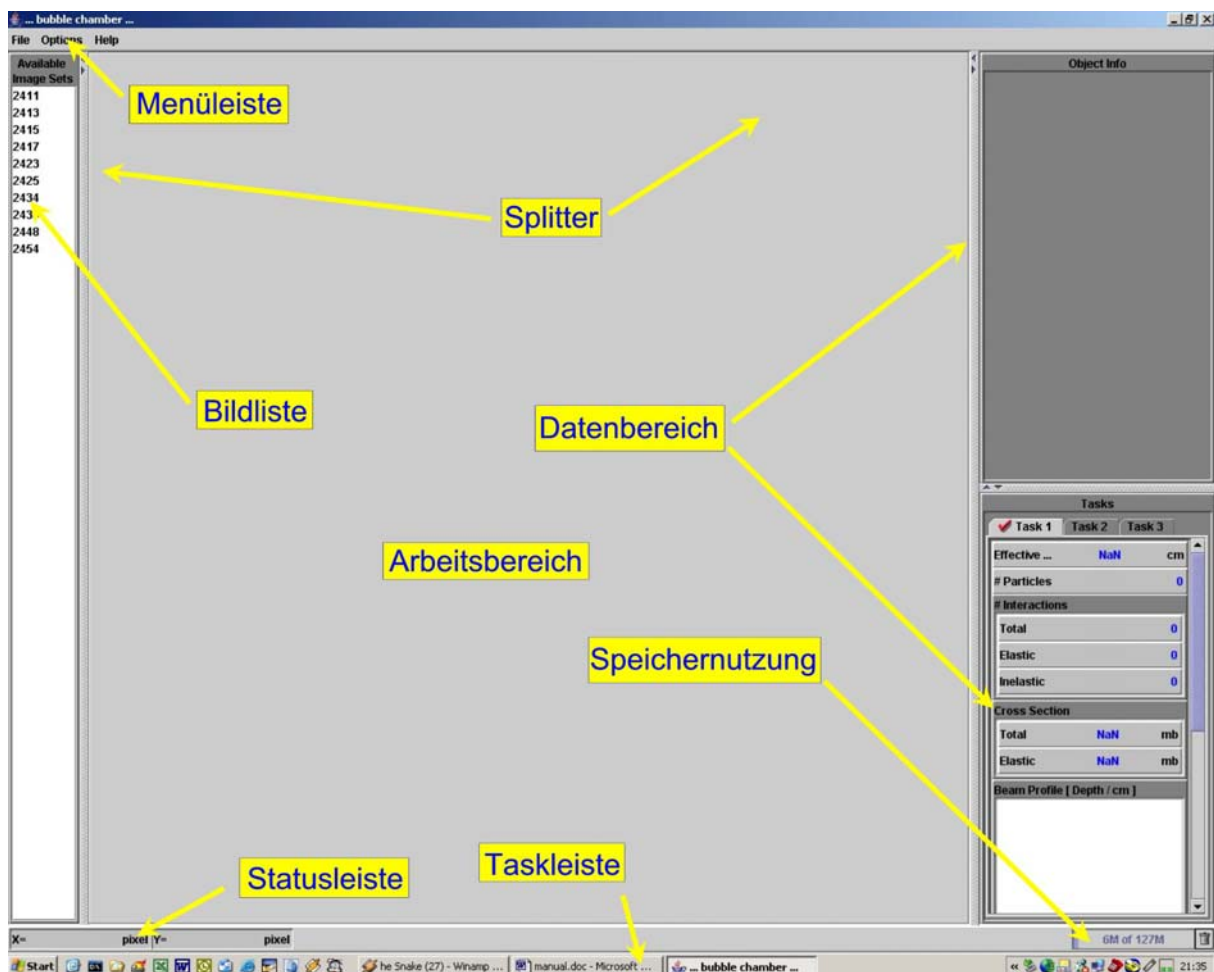


Abbildung 2: Aufbau des Anwendungs-Fensters

Der Aufbau des Fensters gliedert sich in fünf Bereiche – eine Menüleiste am oberen Rand und eine Statusleiste am unteren Rand, die Bildliste links, den eigentlichen Arbeitsbereich in der Mitte und den Bereich zum Anzeigen von Messergebnissen (Datenbereich) rechts. Sowohl zwischen Bildliste und Arbeitsbereich, als auch zwischen Arbeits- und Datenbereich befinden sich senkrechte Splitter mit deren Hilfe die Aufteilung der verfügbaren Fläche zwischen den drei Bereichen verändert werden kann.

2.1.1 Menüleiste

In der Menüleiste befinden sich zwei Menüs, das File-Menü und das Help-Menü.

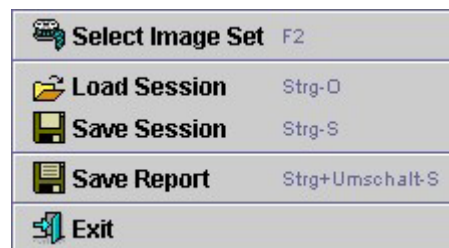


Abbildung 3: File-Menü

Im File-Menü gibt es den Menüpunkt „Exit“, der das Programm beendet. Über den Menüpunkte „Save Session“ können die aktuellen Einstellungen und Daten gespeichert, und über „Load Session“ später wieder hergestellt werden¹³. Die aktuellen Messwerte können über den Menüpunkt „Save Report“ als Bericht im HTML-Format¹⁴ gespeichert werden. Falls die Anwendung nicht mit dem Parameter „PreLoad_ImageSets=true“ gestartet wurde, ist außerdem der Menüpunkt „Select Image Set“ aktiviert, der die Auswahl der verwendeten Blaskameraufnahmen erlaubt.



Abbildung 4: Options-Menü

Der Menüpunkt Magnification im Options-Menü ermöglicht es den Umrechnungsfaktor zwischen Pixeln im Bild und realen Koordinaten in der Blaskammer zu verändern. Für die realen Koordinaten in der Blaskammer werden Zentimeter verwendet.



Abbildung 5: Help-Menü

Über das Hilfe-Menü lassen sich zwei kleine Fenster mit Hinweisen über die Anwendung und verfügbare Dokumentation anzeigen.

¹³ Siehe hierzu auch Abschnitt „Datensicherung“ auf Seite 47.

¹⁴ Weitere Informationen hierzu finden sich im Abschnitt „Einstellungen beim Aufruf“ auf Seite 6.

2.1.2 Statusleiste

Die Statusleiste zeigt während der Arbeit mit den Blasekammeraufnahmen auf der linken Seite die Koordinaten des Mauszeigers relativ zur oberen linken Ecke der Aufnahme in Pixel an. Auf der rechten Seite wird die aktuelle Speichernutzung angezeigt. Durch Klicken auf das Icon kann das Ausführen der sogenannten Garbage-Collection erzwungen werden, wodurch manchmal zusätzlicher Speicher frei gegeben und die Geschwindigkeit der Anwendung erhöht werden kann. Dieses Vorgehen empfiehlt sich besonders dann, wenn die Software zunehmend langsamer auf Benutzereingaben reagiert.

2.1.3 Bildliste

In der Bildliste werden alle zur Zeit verfügbaren Blasekammeraufnahmen aufgelistet. Durch Klicken auf einen Eintrag dieser Liste wird die zugehörige Karteikarte zum Bearbeiten ausgewählt. Sollte die Karteikarte noch nicht vorhanden sein, wird sie neu angelegt.

2.1.4 Arbeitsbereich

Im Arbeitsbereich steht für jede Blasekammeraufnahme eine Karteikarte zur Verfügung. Durch das Klicken auf diese Karteikarten kann jeweils ein Aufnahme zur Bearbeitung ausgewählt werden. Die Karteikarten sind in die im Folgenden beschriebenen Bereiche Views, Navigation, Werkzeugleiste (Toolbar) und Workspace aufgeteilt. Durch vertikale Splitter zwischen den einzelnen Bereichen kann deren Größe variiert werden.



Abbildung 6: Arbeitsbereich

Anmerkung: Falls das Programm nicht mit dem Parameter „PreLoad_ImageSets=true“ gestartet wurde, können die Karteikarten einzeln über den Punkt „Remove Image Set“ im Kontext-Menü der Karteikarten-Beschriftung wieder entfernt werden. Über den Menüpunkt „Remove Unused Image Sets“ können bequem sämtliche Karteikarten entfernt werden, auf denen noch keine Messobjekte eingefügt wurden, und die somit keinen Beitrag zu den aktuellen Messwerten liefern. Die Beschriftung solcher ungenutzter Karteikarten ist in schwarz gehalten. Beim Einfügen des ersten Messobjekts wechselt die Farbe der Beschriftung zu blau. Vor dem Löschen der blau beschrifteten Karteikarten erfolgt eine Sicherheitsabfrage.

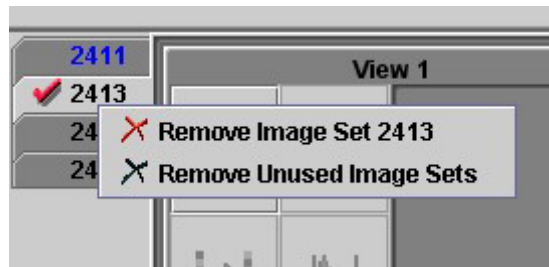


Abbildung 7: Arbeitsbereich – Kontext-Menü

Anmerkung: Das Ändern von Einstellungen auf einzelnen Karteikarten beeinflusst die Einstellungen der anderen Karten in der Regel nicht. Die einzige Ausnahme von dieser Regel bildet die Wahl des Messbereichs¹⁵.

Views

Mit Hilfe der Views kann ausgewählt werden, welche der Aufnahmen aus den verschiedenen Ansichten angezeigt, überlagert oder gegeneinander verschoben werden sollen. Auf diese und alle weiteren Möglichkeiten zur Manipulation der Blasenkammeraufnahmen geht der Abschnitt „Blasenkammeraufnahmen“¹⁶ ausführlicher ein.

Navigation

Hier wird ein Ausschnitt der Blasenkammeraufnahme ausgewählt. Dieser Ausschnitt wird im Bereich Workspace vergrößert angezeigt. Position und Größe des Ausschnitts werden dabei getrennt eingestellt. Das farblich hervorgehobene Rechteck kann mit der Maus sowohl verschoben als auch in seiner Größe verändert werden. Über den Schieberegler am unteren Rand kann die Größe des gewählten Bereichs zwischen minimal und maximal verändert werden. Die unterhalb des Schiebereglers befindlichen Schaltflächen erlauben das Umschalten zwischen vier verschiedenen Auswahlmöglichkeiten –  (= maximale Vergrößerung),  (= minimale Vergrößerung),  (= die letzte Auswahl, die weder minimal noch maximal war) und  (= Umschalten zwischen den beiden letzten Auswahlen). Dabei bleibt beim Umschalten nach minimal und benutzerdefiniert die linke obere Ecke der Auswahl fest.

Durch Drücken der linken Maustaste in einem nicht markierten Bereich des Bildes und anschließendes Ziehen der Maus wird ein gestricheltes Rechteck eingezeichnet. Nach Loslassen der Maustaste wird der auf diese Weise markierte Bereich als neue Auswahl in die Navigation und damit auch in den Workspace übernommen.

Die Positionen von Messobjekten¹⁷ werden durch kleine farbige „Stecknadeln“ angezeigt. Werden diese angeklickt, dann wird das zugehörige Messobjekt aktiviert. Danach wird versucht die Auswahl unter Beibehaltung der aktuellen Größe so zu verschieben, dass ein ausgezeichneter Punkt des Messobjekts möglichst in der Mitte des Workspace angezeigt wird. Die Stecknadel des jeweils aktiven Messobjekts wird durch eine grüne Umrandung des Kopfes hervorgehoben.

¹⁵ Weitere Informationen hierzu finden sich in der Beschreibung zu Messobjekt „Ruler“ auf Seite 28.

¹⁶ Siehe Seite 21.

¹⁷ Erläuterungen zur Benutzung der verschiedenen Messobjekte werden im Abschnitt „Beschreibung der Messobjekte“ auf Seite 25 gegeben.

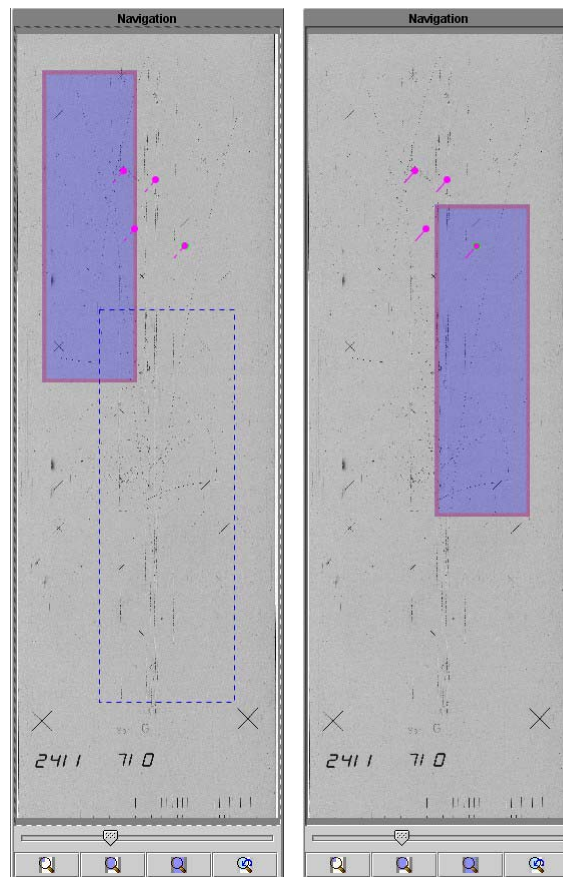


Abbildung 8: Navigation – Auswahl und „Stecknadeln“

Werkzeugleiste

Über die Werkzeugleiste kann eingestellt werden, welche Sorten von Messobjekten im Workspace angezeigt werden sollen bzw. neu eingefügt werden dürfen. Dazu klickt man auf die Schaltfläche mit dem Symbol des Objekttypen der ein- bzw. ausgeblendet werden soll. Diese Einstellungsmöglichkeit dient in erster Linie der besseren Übersichtlichkeit bei der Arbeit mit komplexen Messobjekten, wie z.B. dem Interaction-Objekt.

Die zugehörigen Stecknadeln ausgeblendeter Messobjekt werden weiterhin im Navigationsbereich angezeigt, allerdings in einer etwas helleren Farbe als die eingeblendeten.



Abbildung 9: Werkzeugleiste zum Ein- und Ausblenden von Objekten

Anmerkung: Der Button „Show Active Only“  ermöglicht das Ausblenden aller Objekte, abgesehen von dem aktuell ausgewählten. In diesem Modus können keine neuen Messobjekte eingefügt werden.

Anmerkung: Insbesondere werden Interaction-Objekte auch dann ausgeblendet, wenn sie einem weiterhin sichtbaren V^0 -Objekt zugewiesen sind.

Workspace

Nur im Workspace können die verschiedenen Messobjekte angezeigt, eingefügt, ausgewählt und verschoben werden. Das Einfügen geschieht über ein Kontext-Menü. Dieses ermöglicht auch die Auswahl von Objekten, die zur Zeit außerhalb des gewählten Bildausschnittes liegen. Dabei wird der Bildausschnitt automatisch so verschoben, dass sich das gewählte Objekt danach möglichst in der Mitte des angezeigten Bereichs befindet.

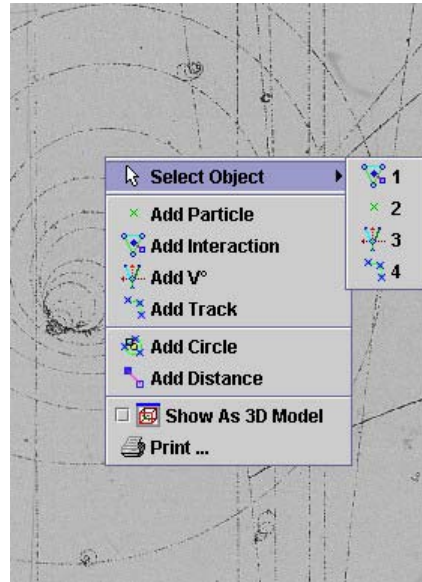


Abbildung 10: Workspace – Kontext-Menü

Über den Menüpunkt „Show As 3D Model“ wird ein zusätzliches Fenster geöffnet, in dem ein dreh- und zoombares Modell der Blasenkammer angezeigt wird. In dieses Modell sind alle vermessenen und derzeit im Workspace angezeigten Track-Objekte, sowie die Spuren der angezeigten Interaction- und V^0 -Objekte eingezeichnet. Verschiedene Elemente der 3D-Ansicht können zwecks einer besseren Orientierung ein- bzw. ausgeblendet werden. Das Zusatzfenster kann durch erneutes Anklicken des Menüpunktes im Kontext-Menü oder durch Klicken auf das entsprechende Icon im Rahmen des Fensters wieder geschlossen werden.

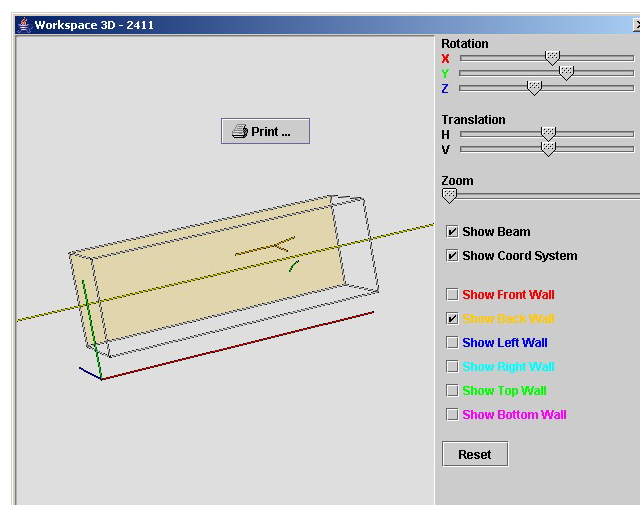


Abbildung 11: Workspace – 3D Model

Der Menüpunkt „Print...“ ermöglicht das Ausdrucken des Workspaces inklusive der angezeigten Messobjekte. Da das Bild hierfür nicht neu berechnet wird, sondern das aktuell angezeigte verwendet wird, nimmt die Qualität des Ausdrucks mit der Anzeigegröße des Workspaces auf dem Bildschirm zu. Das 3D Modell des Workspaces kann über ein Kontext-Menü im Anzeigebereich des Zusatzfensters ebenfalls ausgedruckt werden.

Vor dem Drucken wird zunächst jeweils ein Fenster angezeigt, in dem das Papierformat und die Seitenränder festgelegt werden können. Danach kann in einem weiteren Fenster der Drucker ausgewählt und konfiguriert werden. Während das Abbrechen des ersten Fensters nur zur Beibehaltung des aktuellen Papierformats führt, wird durch Abbrechen des zweiten Fensters auch der Druckvorgang abgebrochen. Der Ausdruck wird jeweils so skaliert, dass er das Papier optimal füllt.

Durch Drücken der linken Maustaste im Workspace und anschließendes Ziehen der Maus wird ein gestricheltes Rechteck eingezeichnet. Nach Loslassen der Maustaste wird der auf diese Weise markierte Bereich als neue Auswahl in die Navigation und damit auch in den Workspace übernommen. Auf diese Art lassen sich Bildausschnitte also komfortabel vergrößern. Gelangt man beim Ziehen an den Rand des Workspaces, dann wird der aktuell ausgewählte Bereich, falls möglich, automatisch in die entsprechende Richtung verschoben.

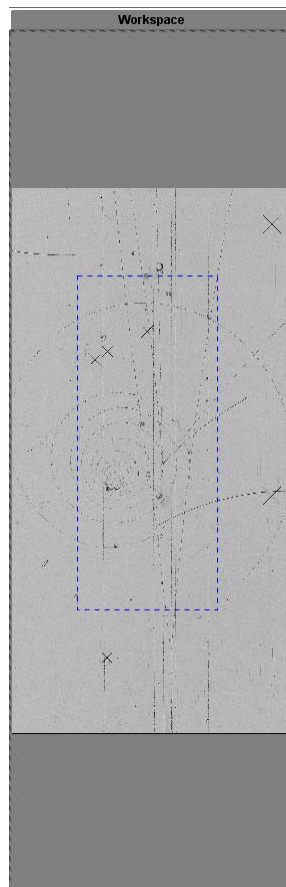


Abbildung 12: Workspace – Auswahl

Doppelklicken auf die Beschriftung des Workspaces öffnet ein neues Fenster und zeigt den Workspace darin an. Hierdurch kann der Workspace z.B. auf einen zweiten Monitor ausgelagert werden. Das Fenster kann in seiner Größe angepasst werden, wodurch gegebenenfalls eine stärkere Vergrößerung erreicht wird, als wenn der Workspace im eigentlichen Anwen-

dungsfenster angezeigt wird. Insbesondere kann der Workspace auf diese Weise auf einen zweiten Monitor ausgelagert werden. Wird das Fenster geschlossen, dann wird der Workspace wieder an seinem ursprünglichen Platz angezeigt. Das Schließen kann durch erneutes Doppelklicken auf die Beschriftung des Workspaces oder durch Klicken auf das entsprechende Icon im Rahmen des Fensters erfolgen. Beim Wechsel zu einer anderen Karteikarte wird das Fenster automatisch geschlossen. Wird das Fenster erneut geöffnet, nimmt es dieselbe Größe und Position ein wie zuvor. Die anfänglichen Wert für Position und Größe können beim Start der Anwendung als Parameter übergeben werden¹⁸.

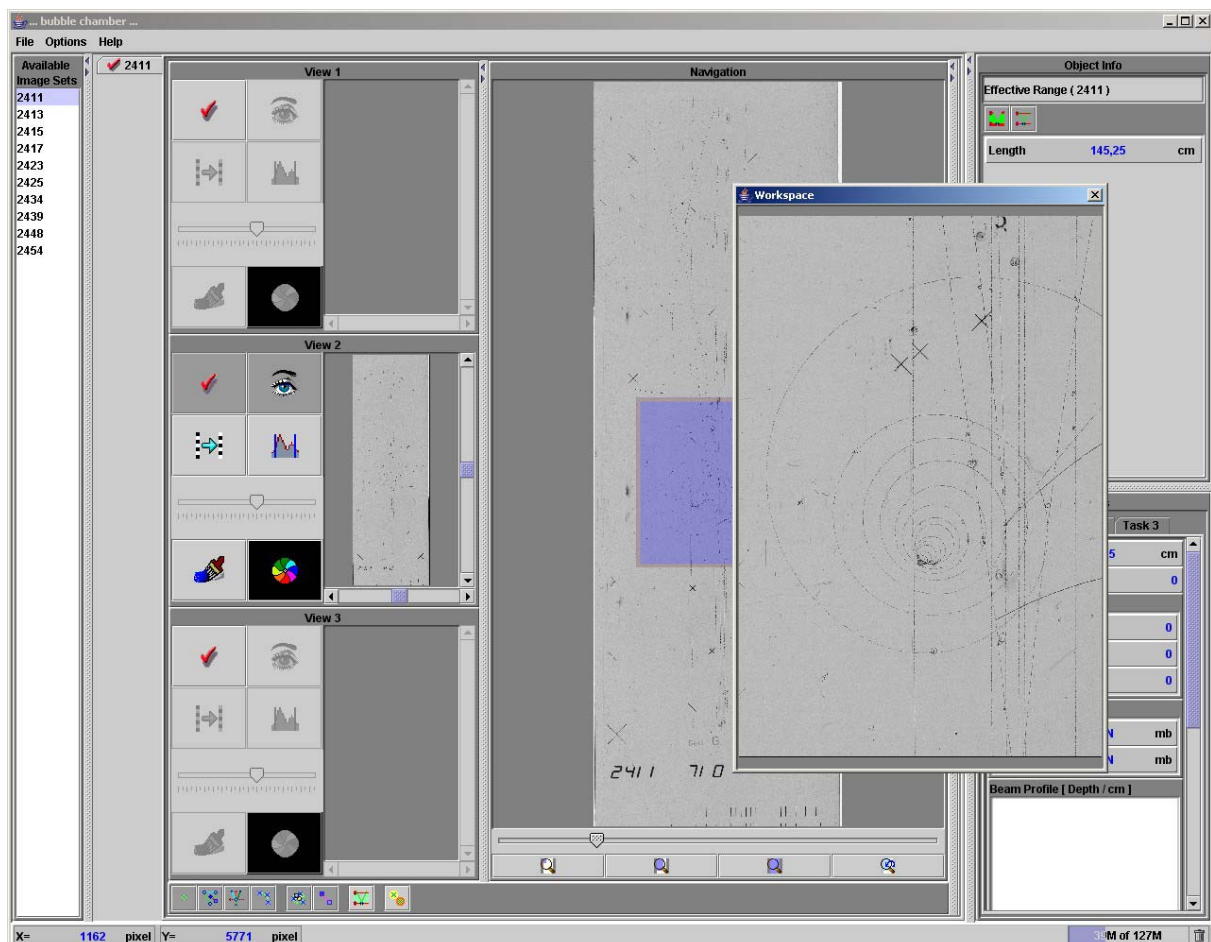


Abbildung 13: Workspace – Fenster

Durch Klicken mit der rechten Maustaste auf die Beschriftung des Workspaces wird ein Kontext-Menü geöffnet. Über dieses Menü kann ebenfalls zwischen normalem und ausgelagertem Workspace umgeschaltet werden.

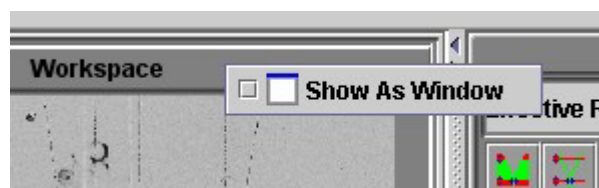


Abbildung 14: Workspace-Beschriftung – Kontext-Menü

¹⁸ Siehe Abschnitt „Einstellungen beim Aufruf“ auf Seite 6.

2.1.5 Datenbereich

Der Datenbereich ist durch einen horizontalen Splitter unterteilt. Im oberen Bereich werden Informationen zu den Messobjekten, „Object Info“, im unteren Bereich Informationen zu den Versuchsaufgaben, „Tasks“, angezeigt. Alle berechneten Werte, mit Ausnahme derjenigen, die sich durch einfaches Abzählen ergeben, werden auf zwei Dezimalstellen genau angegeben.

Messobjekt - Object Info

Hier wird jeweils ein Icon, als Symbol für den Objekttyp, und der Name zur Identifikation des Objekts angezeigt. Unterhalb des Namens befindet sich eine Werkzeugleiste (Toolbar) über die verschiedene visuelle und organisatorische Eigenschaften des Objekts gesteuert werden können. Der Zustand der Schaltflächen (aktiviert, deaktiviert, gedrückt oder nicht gedrückt) gibt Auskunft über die aktuellen Einstellungen – durch eine dieser Schaltflächen kann das Messobjekt auch wieder gelöscht werden.

Den restlichen Platz nimmt die Anzeige von Messwerten ein, die mit diesem Objekt gewonnen werden. Bei verschiedenen Objekten lassen sich in diesem Bereich auch noch physikalisch relevante Einstellungen bzw. Einstellungen an Unterobjekten vornehmen. Um welche Messwerte und Einstellungen es sich bei den einzelnen Objekten handelt, wird weiter unten, im Abschnitt „Beschreibung der Messobjekte“, erklärt. Ein Teil der Eigenschaften, die hier eingestellt werden können, sind auch über ein Kontext-Menü im Workspace zugänglich.

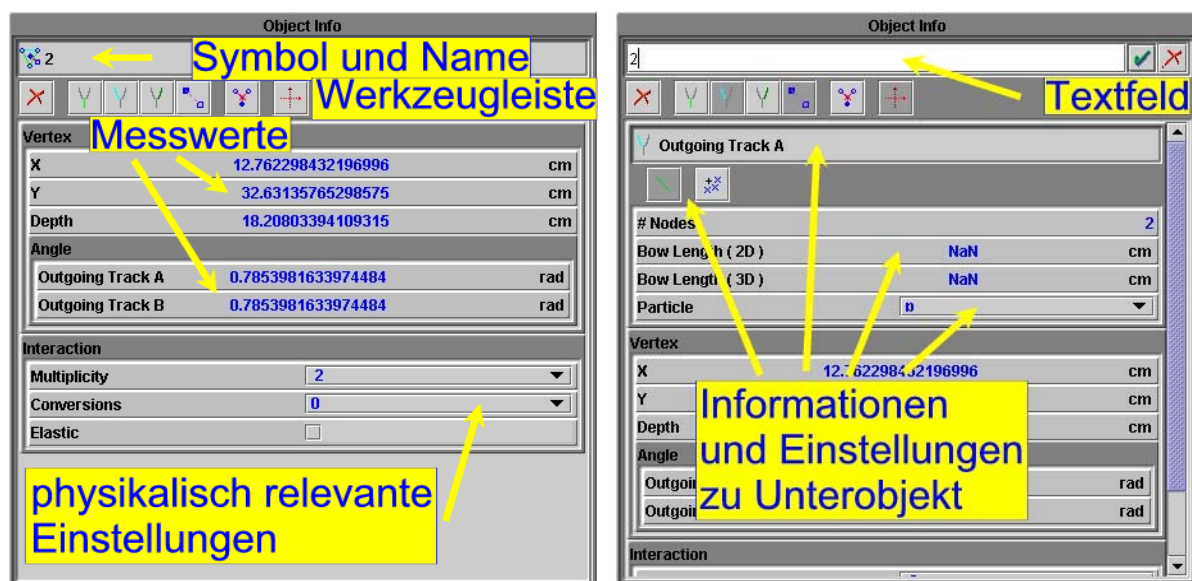


Abbildung 15: Information zu Messobjekt - Object Info

Die Namen aller Objekte, die der Benutzer selbst eingefügt hat, lassen sich ändern, indem man direkt auf den angezeigten Namen klickt und den neuen Namen im daraufhin erscheinenden Textfeld einträgt. Das Editieren des Namens lässt sich mit der Enter-Taste abschließen oder mit der Escape-Taste abbrechen. Anstatt dieser beiden Tasten können auch die beiden neben dem Textfeld angezeigten Schaltflächen zum Beenden bzw. Abbrechen des Editierens benutzt werden.

Anmerkung: Da die Objekte beim Einfügen nur eine laufende Nummer als Namen erhalten, empfiehlt es sich zumindest die Namen der Track-, Interaction- und V^0 -Objekte zu ändern. Die Namen werden auch an anderen Stellen im Programm angezeigt, wodurch sich sinnvoll benannte Objekte dann viel einfacher identifizieren lassen. Anstatt eines Namens kann in dieses Feld allerdings auch eine Beschreibung von Besonderheiten eingegeben werden, die man beobachtet hat.

Versuchsaufgaben - Tasks

Der Bereich Versuchsaufgaben ist durch drei Karteikarten gegliedert, auf denen die Ergebnisse zu je einer Versuchsaufgabe angezeigt werden. Neben der Anzeige von Ergebnissen dient dieser Bereich auch der Navigation durch die verschiedenen Blasenkammeraufnahmen. Durch Doppelklicken in den Listen und Tabellen, bzw. auf die Beschriftungen der Auswahlfelder wird das zugehörige Messobjekt ausgewählt und dabei die entsprechende Karteikarte im Arbeitsbereich aktiviert und gegebenenfalls sichtbar gemacht.

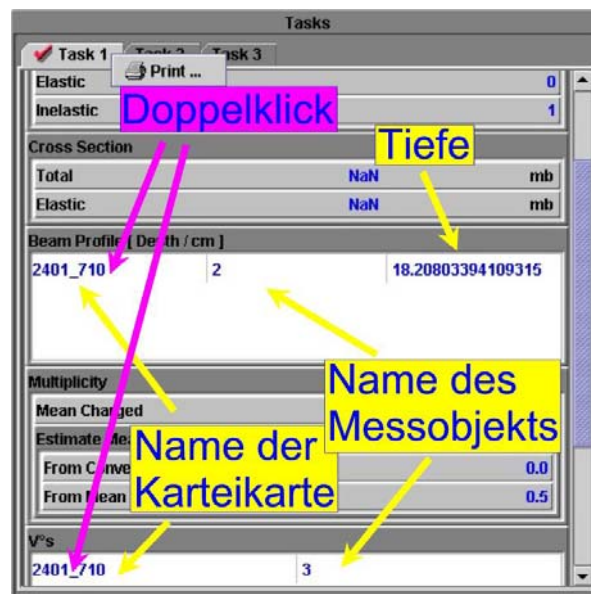


Abbildung 16: Datenbereich - Task 1

In den Auswahlfeldern und Listen wird jeweils der Name des Objekts und die Bezeichnung der zugehörigen Karteikarte bzw. Blasenkammeraufnahme angegeben. Zusätzlich wird der Inhalt als Hinweis eingeblendet wenn man die Maus über das Auswahlfeld bewegt.

Tasks

Task 1 Task 2 Task 3 Print ...

Track

Range	P_abs	P_x	P_y	P_z
0.0	2674.2476...	-502.98293...	372.57994...	-599.9601...
28.810729...	2587.9253...	-402.43205...	452.73606...	-256.60358...
49.460787...	2189.9638...	-258.28022...	442.76609...	-212.1291...
73.284856...	1878.3245...	-310.87833...	310.87833...	-1826.1468...

From Curvature: 2674.24766884623

From Range: 141.0763665701186

Difference: 2533.171330276114

From Curvature

Range	P_abs	P_x	P_y	P_z
0.0	2533.171330276114	-476.4487384261356	352.9249914267671	-2462.8027530764957

Abbildung 17: Datenbereich - Task 2

Tasks

Task 1 Task 2 Task 3 Print ...

Outgoing Track 4

Length	Angle
NaN	NaN

Momentum [MeV / c]

Range	P_abs	P_x	P_y	P_z
0.0	33.160759...	27.053335...	-7.608...	505...
7.8721931...	29.389649...	-9.3744337...	-23.07...	529...
16.051845...	27.913917...	-17.803240...	15.57...	835...
21.086663...	30.209294...	-25.104490...	-5.021...	8981...

From Curvature: 33.16075950321724

From Range: 355.1946687310633

Difference: 322.0339092278461

Outgoing Track B

Length	Angle
NaN	NaN

Abbildung 18: Datenbereich - Task 3

Anmerkung: An einigen Stellen wird der Impuls nur betragsmäßig angezeigt. Wenn man an diesen Stellen die Maus über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des Impulsvektors in Form eines Hinweises eingeblendet. Falls der Impuls aus der Reichweite berechnet wurde, dann wird auch ein von Null verschiedener Wert für die Reichweite angegeben. Für Impulse, die aus der Krümmung berechnet wurden, wird der Radius angegeben.

Anmerkung: Bei den oben gezeigten Screenshots handelt es sich nur um Ausschnitte der Karteikarten zu den Versuchsaufgaben. Vollständige Versionen finden sich im Anhang in Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

Durch Klicken mit der rechten Maustaste auf die Beschriftungen der Karteikarten wird ein Kontext-Menü geöffnet. Der Menüpunkt „Print...“ in diesem im Menü ermöglicht das Ausdrucken der jeweiligen Karteikarte.

Vor dem Drucken wird zunächst jeweils ein Fenster angezeigt, in dem das Papierformat und die Seitenränder festgelegt werden können. Danach kann in einem weiteren Fenster der Drucker ausgewählt und konfiguriert werden. Während das Abbrechen des ersten Fensters nur zur Beibehaltung des aktuellen Papierformats führt, wird durch Abbrechen des zweiten Fensters auch der Druckvorgang abgebrochen. Der Ausdruck wird jeweils so skaliert, dass er das Papier optimal ausfüllt.

Weitere Kontext-Menüs werden durch Klicken mit der rechten Maustaste auf die Beschriftung des Strahlprofils („Beam Profile [Depth / cm]“) auf der ersten Karteikarte, bzw. auf die Beschriftungen der Impulsangaben („Momentum [MeV / c]“) auf der zweiten und dritten Karteikarte geöffnet. Es kann über diese Menüs jeweils ein Zusatzfenster geöffnet werden, in welchem die Daten in Form eines Diagramms dargestellt werden. Geschlossen werden die Zusatzfenster entweder über die entsprechenden Icons in den Rahmen der Fenster, oder über den Eintrag des Kontext-Menüs, aus dem heraus sie geöffnet wurden.

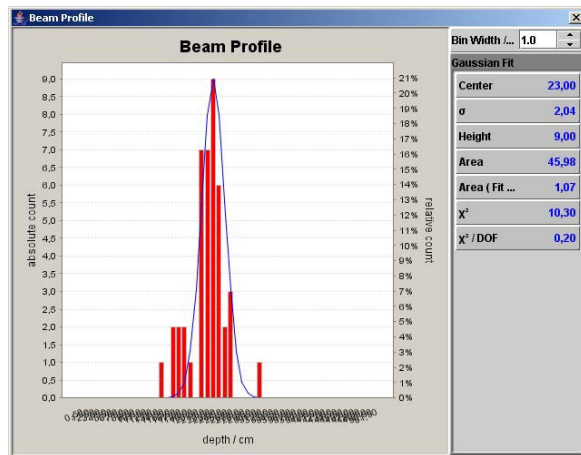


Abbildung 19: Zusatzfenster – Strahlprofil

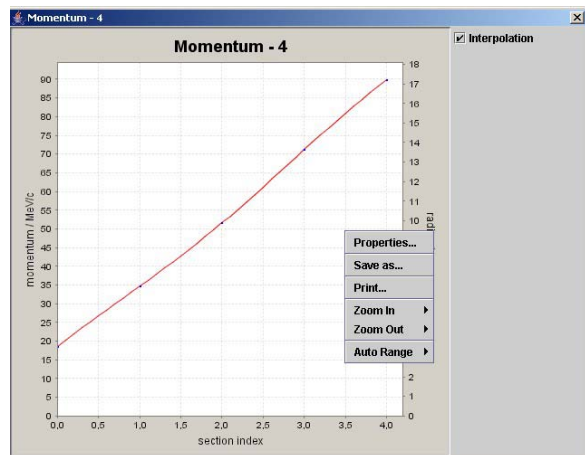


Abbildung 20: Zusatzfenster – Impuls

Zusätzlich zur Erstellung des Strahlprofils wird automatisch ein Gauss-Fit für das Profil durchgeführt, sobald es aus mehr als drei Bins besteht. Die Bin-Breite kann dabei frei gewählt werden. Da für jedes Bin nur der Wert des Gauss-Fits in der Mitte des Bins eingezeichnet wird, wirkt die angezeigte Kurve bei einer geringen Anzahl von Bins recht eckig. Sie weicht gegebenenfalls von der tatsächlichen Form ab, die sie sich aus den angezeigten Parametern ergeben würde, und ist daher nur als visuelle Hilfe zu verstehen.

In den Impuls-Diagrammen kann für Spuren die aus mindestens sechs Punkten (= fünf Impuls-Werte) bestehen eine Interpolation durchgeführt werden.

Anmerkung: Die Diagramme haben jeweils ein eigenes Kontext-Menü. Dieses ermöglicht unter anderem das Ausdrucken und das Speichern des Diagramms als Grafik.

2.1.6 Splitter

Splitter kommen in zwei Ausrichtungen vor, horizontal und vertikal. Beide Varianten lassen sich durch Ziehen mit der Maus verschieben. Zusätzlich befinden sich auf jedem Splitter zwei kleine Pfeile (bei horizontalen Splittern links, bei vertikalen oben), mit deren Hilfe sich der Bereich auf den die Spitze des jeweiligen Pfeils zeigt komplett ausblenden bzw. der Bereich von dem die Spitze wegzeigt, einblenden lässt.



horizontal



vertikal

Abbildung 21: Horizontaler und Vertikaler Splitter

2.2 Blaskammeraufnahmen

Zum Anzeigen und Manipulieren der Blaskammeraufnahmen stehen etliche, im Folgenden beschriebene, Werkzeuge zur Verfügung.

2.2.1 Auswählen

Die Auswahl der Blasenkammeraufnahmen erfolgt über die zugehörigen Karteikarten. Falls die Anwendung nicht mit dem Parameter „PreLoad_ImageSets=true“ gestartet wurde, können über die Bildliste¹⁹ bzw. den Menü-Punkt „Select Image Set“ im File-Menü neue Blasenkammeraufnahmen hinzugefügt werden. Über das Kontext-Menü²⁰ der Karteikarten-Beschriftung können Aufnahmen dann wieder entfernt werden.

Image-Select-Dialog

Beim Hinzufügen von Blasenkammeraufnahmen öffnet sich ein zusätzliches Fenster – der Image-Select-Dialog. Dieses Fenster enthält auf der rechten Seite eine Liste der vorhandenen Bilder und die Möglichkeit zur Vorschau der drei Ansichten, die den restlichen Platz einnimmt. Der Vorschaubereich ist dreigeteilt und die Vorschau erfolgt für jeden View getrennt. An den unteren Rändern der Anzeigebereiche für die einzelnen Views steht jeweils ein Auswahlfeld zur Verfügung über das bestimmt werden kann, ob für diesen View ein Vorschaubild geladen werden soll. Durch Auswahl eines Eintrags in der Bildliste werden die entsprechenden Bilder in die Vorschau geladen. Über zwei Schaltflächen kann die Auswahl abgebrochen oder bestätigt werden. In beiden Fällen schließt sich dadurch das Fenster. Falls die Auswahl bestätigt wurde, werden die Bilder auf einer neu eingefügten Karteikarte angezeigt.

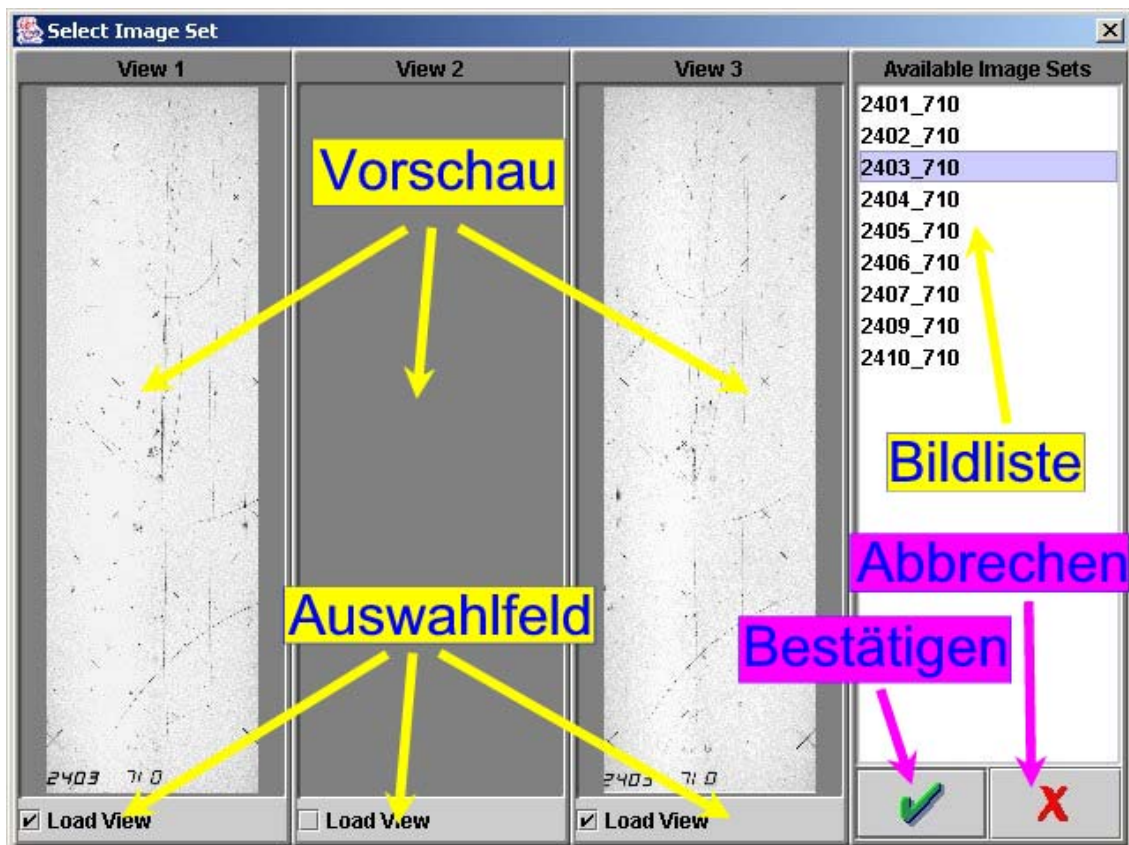


Abbildung 22: Dialog zur Bildauswahl

Anmerkung: Die Größe des Fensters und damit auch der Vorschau-Bilder kann durch Ziehen mit der Maus verändert werden.

¹⁹ Siehe Abschnitt „Bildliste“ auf Seite 11.

²⁰ Siehe Abbildung 7 auf Seite 13.

2.2.2 Manipulieren

Zur Manipulation der Blasenkameraufnahmen stehen für jede Ansicht dieselben Möglichkeiten zur Verfügung. Vorgenommen werden die Einstellungen über verschiedene Schaltflächen und Schieberegler im zugehörigen View-Bereich.

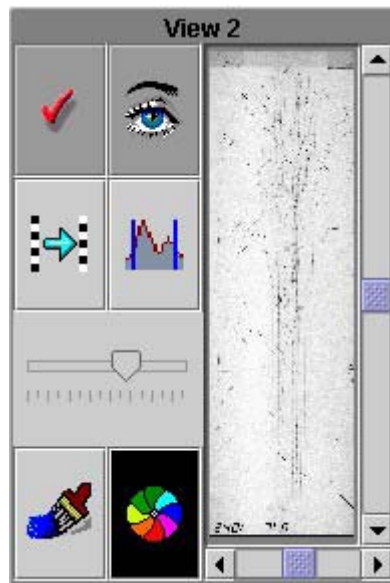


Abbildung 23: Bedienelemente zur Bildmanipulation

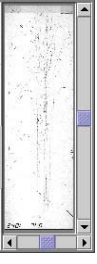
Laden

	Falls das Bild noch nicht geladen wurde, kann das mit dieser Schaltfläche nachgeholt werden. Weiterhin wird über diese Schaltfläche bestimmt, ob ein Bild nach dem Wechseln zwischen verschiedenen Karteikarten bzw. Blasenkameraufnahmen erneut geladen werden soll. <i>Anmerkung:</i> Beim Wechseln zu einer anderen Karteikarten werden die Originalbilder der zuvor ausgewählten Karte, aus denen die verschiedenen Ansichten im Programm erzeugt werden, aus dem Arbeitsspeicher entfernt, um so Speicherplatz zu sparen. Nur die angezeigten Versionen der Bilder bleiben erhalten, bis durch das Verändern von Einstellungen ein Neuladen des Originalbildes erforderlich wird.
---	--

Anzeigen

	Zeigt das Bild im Navigations-Bereich und den dort gewählten Ausschnitt im Workspace an. Falls auch andere Views angezeigt werden, kommt es zur Überlagerung der Bilder. Dabei werden die Bilder in der Reihenfolge View 1, View 2, View 3 von unten nach oben angeordnet. Änderungen dieser Einstellung wirken sich nicht auf das Vorschaubild aus.
---	--

Verschieben

	Mit Hilfe der beiden Scrollbars kann das Bild horizontal um maximal die Hälfte seiner Breite nach links oder rechts und vertikal um maximal die Hälfte seiner Höhe nach oben oder unten verschoben werden. Dabei verschiebt Klicken auf die Pfeile das Bild um ein Prozent der im Workspace angezeigten Breite bzw. Höhe und Klicken zwischen einen Pfeil und den Knopf um 10 Prozent in Richtung der Pfeilspitze. Benötigt wird diese Funktionalität z.B. für das Stereo-Shift-Verfahren. Änderungen dieser Einstellung wirken sich nicht auf das Vorschaubild aus.
---	--

Invertieren

	Beim Invertieren werden die Helligkeiten aller Bildpunkte umgekehrt, indem für jeden einzelnen Punkt der neue Helligkeitswert, durch Subtrahieren des aktuellen Wertes vom höchstmöglichen Wert (255), berechnet wird. Invertiert wird erst nachdem der Kontrastfilter und das Kolorieren ausgeführt wurden. Änderungen dieser Einstellung wirken sich auch auf das Vorschaubild aus. <i>Anmerkung:</i> Beim Überlagern von zwei Bildern lassen sich die Spuren in den beiden Aufnahmen besonders gut voneinander unterscheiden, wenn man eins der Bilder invertiert.
---	--

Kontrast

	Durch den Kontrastfilter werden alle Bildpunkte, die dunkler sind als der angegebene Schwellenwert, als reines Weiß dargestellt. Der Kontrastfilter wird vor dem Kolorieren und Invertieren angewendet. Änderungen dieser Einstellung wirken sich auch auf das Vorschaubild aus.
---	--

Schwellenwert

	Über die Stellung des Schiebereglers wird der Schwellenwert für den Kontrastfilter angegeben. Sein Wert kann zwischen 192 (dunkel) und 255 (hell) variiert werden. Der Regler kann nur verstellt werden, wenn der Kontrastfilter aktiviert ist. Änderungen dieser Einstellung wirken sich auch auf das Vorschaubild aus.
---	--

Kolorieren

	Die Graustufen des Bildes werden in Stufen der gewählten Farbe umgewandelt. Reines Weiß und Schwarz bleiben dabei erhalten. Das Kolorieren wird nach dem Kontrastfilter und vor dem Invertieren ausgeführt. Änderungen dieser Einstellung wirken sich auch auf das Vorschaubild aus.
---	--

Farbwahl



Diese Schaltfläche öffnet ein Fenster zur Auswahl der Farbe, die zum Kolorieren verwendet werden soll. Damit der Benutzer sieht, welche Farbe gewählt ist, wird der Hintergrund des Icons bzw. der Schaltfläche in der ausgewählten Farbe dargestellt.

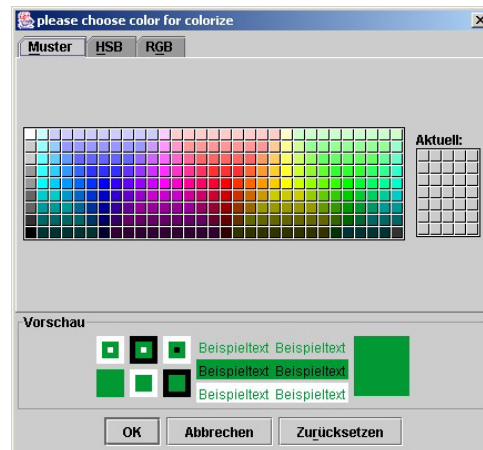


Abbildung 24: Fenster zur Farbwahl

Änderungen dieser Einstellung wirken sich auch auf das Vorschaubild aus.

2.2.3 Bildausschnitt

Den im Workspace angezeigten Bildausschnitt wählt man wie im Abschnitt „Navigation“²¹ beschrieben.

2.3 Beschreibung der Messobjekte

Die im folgenden beschriebenen Messobjekte bilden den zentralen Bestandteil der Software. Mit ihrer Hilfe werden nicht nur sämtliche Messwerte zu einzelnen Wechselwirkungen gewonnen, sondern sie dienen, indem sie gezählt werden, auch zur Bestimmung des Wirkungsquerschnitts und der mittleren Multiplizität. Die Objekte werden im Anschluss in der Reihenfolge ihrer Komplexität vorgestellt.

Jedes der Objekte besteht aus einer oder mehreren sogenannten Nodes, die durch kleine Kreuze oder andere Symbole in verschiedenen Farben markiert sein können. Sobald ein Objekt aus mehreren Nodes besteht, werden in der Regel Verbindungslinien zwischen verschiedenen Nodes eingezeichnet. Diese Linien können gepunktet, gestrichelt oder auch durchgezogen sein und sind ebenfalls in verschiedenen Farben vorhanden. Bei manchen Objekten ist es weiterhin möglich einzelne Nodes zu entfernen bzw. neue hinzuzufügen.

Anmerkung: Bei gepunkteten und gestrichelten Linien handelt es sich in der Regel um Konstruktionslinien, die nicht auf die Maus reagieren. Bei manchen Objekten besteht die Möglichkeit bestimmte Linien auszublenden. Die ausgeblendeten Linien werden dann gestrichelt

²¹ Siehe Seite 13.

dargestellt. Gepunktete Linien hingegen verbinden ausgezeichnete Punkte verschiedener (Teil-) Objekte und werden nicht mehr angezeigt, sobald eines der beteiligten (Teil-) Objekte ausgeblendet wird.

In der Regel können alle Nodes verschoben werden. Bei vielen geschieht dies unabhängig von den anderen Nodes des Objekts, es gibt aber auch Nodes, mit deren Hilfe das gesamte (Teil-) Objekt, also alle zugehörigen Nodes verschoben werden können. Das Verschieben ganzer (Teil-) Objekte auch erreicht werden, indem man mit der Maus an den Verbindungslinien zieht. Welche Auswirkungen das Ziehen an einer Stelle hat bzw. ob es überhaupt möglich ist, wird durch die Form des Mauszeigers mitgeteilt. Sie verändert sich während man den Mauszeiger über das Objekt bewegt.

Liegt der Eingabe-Fokus auf einem Unterobjekt (z.B. auf einer Node eines Track-Objekts), dann kann zwischen den verschiedenen Unterobjekten auf selber Ebene (also den anderen Nodes des Tracks) mit den Tasten Pos 1, Ende, Bild-Auf und Bild-Ab gewechselt werden. Zu übergeordneten Objekten kann man mit der Escape-Taste wechseln (z.B. von Node zu Distance), zu untergeordneten mit der Enter-Taste (z.B. von Distance zur ersten Node). Mit der Leertaste und der Löschen-Taste kann von den Nodes in einem Unterobjekt zur ersten Node in einem anderen Unterobjekt gewechselt werden (z.B. von einer Node auf einer Spur zur ersten Node im zugehörigen Marker-Objekt).

Gelangt man beim Ziehen bzw. Verschieben eines Objektes an den Rand des Workspaces, dann wird der aktuell ausgewählte Bereich, falls möglich, automatisch in die entsprechende Richtung verschoben.

Mauszeiger	Erläuterung
	Standard Mauszeiger. Sofern der Zeiger sich über einem Objekt befindet, kann dieses durch Klicken aktiviert bzw. ausgewählt werden.
	Wenn der Zeiger die Form einer Hand annimmt, kann die darunter befindliche Node unabhängig von allen anderen Nodes durch Ziehen mit der Maus verschoben werden.
	Diese Form wird angezeigt, wenn die Maus über eine Node bewegt wird, mit deren Hilfe das gesamte Objekt verschoben werden kann.
	Bei Bewegen der Maus über Verbindungslinien, die das Verschieben des gesamten Objektes erlauben, nimmt der Mauszeiger diese Form an.
	Die unter dem Mauszeiger befindliche Node kann nur in vertikaler Richtung, also nach oben oder unten, verschoben werden.
	Die unter dem Mauszeiger befindliche Node kann nur in horizontaler Richtung, also nach links oder rechts, verschoben werden.
	Dieser Mauszeiger signalisiert, dass sich ein Track-Objekt im sogenannten Einfüge-Modus befindet. Bei jedem Klick wird eine neue Node an der aktuellen Maus-Position in das Track-Objekt eingefügt.

Tabelle 3: Mauszeiger der Messobjekte

Alle beweglichen Elemente eines Messobjekts werden, sobald man sie anklickt, farblich hinterlegt und auf diese Weise markiert. Die Hervorhebung kann in zwei verschiedenen Farbtönen (gelb und orange) erfolgen. Der dunklere Farbton (orange) deutet dabei an, dass die derart markierten Objekte auch mit den Pfeiltasten bzw. den Zifferntasten des Nummernblocks auf der Tastatur verschoben werden können.

Anmerkung: Das Verschieben mit Hilfe der Tastatur bietet sich, da es pixelgenau arbeitet, immer dann an, wenn man Objekte besonders genau ausrichten oder positionieren möchte.

Zu jedem Messobjekt wird, wenn es selektiert ist, die „Object Info“ im Datenbereich angezeigt. Über die Werkzeugleiste in der „Object Info“ und über das Kontext-Menü des Objekts können visuelle und physikalisch relevante Eigenschaften des Objekts beeinflusst werden.

Der Bereich, welcher in der „Object Info“ unterhalb der Werkzeugleiste liegt, kann über einen Eintrag im Kontext-Menü des zugehörigen Messobjekts ausgedruckt werden.

Vor dem Drucken wird zunächst jeweils ein Fenster angezeigt, in dem das Papierformat und die Seitenränder festgelegt werden können. Danach kann in einem weiteren Fenster der Drucker ausgewählt und konfiguriert werden. Während das Abbrechen des ersten Fensters nur zur Beibehaltung des aktuellen Papierformats führt, wird durch Abbrechen des zweiten Fensters auch der Druckvorgang abgebrochen. Der Ausdruck wird jeweils so skaliert, dass er das Papier optimal füllt.

Während der Eingabe-Fokus auf einem Messobjekt liegt, wird durch Drücken der Entfernen-Taste dasjenige Objekt gelöscht, dessen Daten zu diesem Zeitpunkt in der „Object Info“ angezeigt werden.

Über eine weitere Werkzeugleiste²² im Arbeitsbereich können alle Objekte eines Typs bzw. alle inaktiven Objekte ein- bzw. ausgeblendet werden. Solange ein Typ ausgeblendet ist, können keine neuen Objekte dieses Typs eingefügt werden.

2.3.1 Particle

Zur Bestimmung des Wirkungsquerschnittes im Rahmen der ersten Versuchsaufgabe wird unter anderem die Anzahl der einlaufenden Teilchen benötigt, sie müssen also gezählt werden. Dazu fügt man lediglich für jede einlaufende Spur ein Particle-Objekt ein. Die Anzahl der eingefügten Objekte wird dann im Datenbereich zu den Versuchsaufgaben auf der Karteikarte „Task 1“ angezeigt.

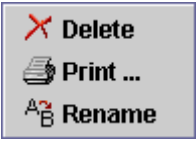
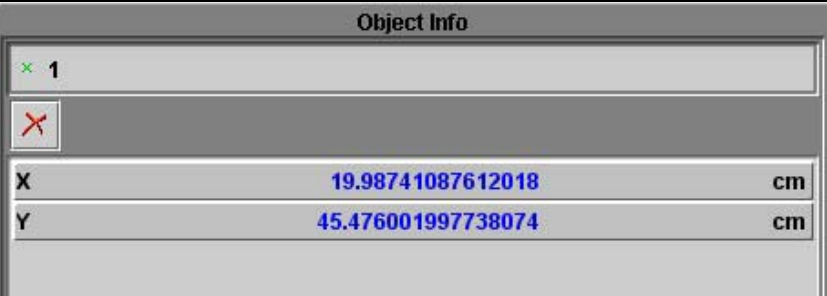
Es sollen nur solche Spuren berücksichtigt werden, deren Beginn außerhalb des Messbereichs liegt und die um weniger als 3° von der Strahlachse abweichen. Als Hilfe bei der Kontrolle der Abweichung kann das Ruler-Objekt verwendet werden.

Die Position des Objekts bezüglich des Messbereichs wird nicht berücksichtigt. Es werden alle Particle-Objekte gezählt, unabhängig davon, ob sie innerhalb oder außerhalb des Messbereichs liegen.

Das Objekt kann beliebig verschoben werden.

²² Siehe Abschnitt „Werkzeugleiste“ auf Seite 14.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info
	

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Delete	Löscht das Messobjekt nach Bestätigen einer Sicherheitsabfrage.
	Print...	Druckt die „Object Info“ aus.
	Rename	Zeigt ein Textfeld ²³ zum Editieren des Objekt-Namen an.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
X	x -Koordinate des Objekts	cm
Y	y -Koordinate des Objekts	cm

Anmerkung: Alle Koordinaten werden generell relativ zur linken oberen Ecke der Blaskameraaufnahme angegeben, auch wenn diese im aktuell angezeigten Bildausschnitt nicht zu sehen sein sollte.

Datenbereich – Versuchsaufgaben²⁴

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
Task 1	# Particles	Anzahl der einfallenden Teilchen bzw. der eingefügten Particle-Objekte.

2.3.2 Distance

Das Distance-Objekt dient zum Messen ebener Abstände, wird aber im Versuch zur Zeit nicht eingesetzt. Sollte die Bestimmung der Vergrößerung wieder als Aufgabe in den Versuch aufgenommen werden, kann es in diesem Umfeld eingesetzt werden. Ebenso kann es selbstverständlich verwendet werden um Kontroll-Messungen durchzuführen.

Der Anfangs- und Endpunkt können unabhängig voneinander an die Positionen verschoben werden, deren Abstand bestimmt werden soll. Wenn man das Objekt mit der Maus an der

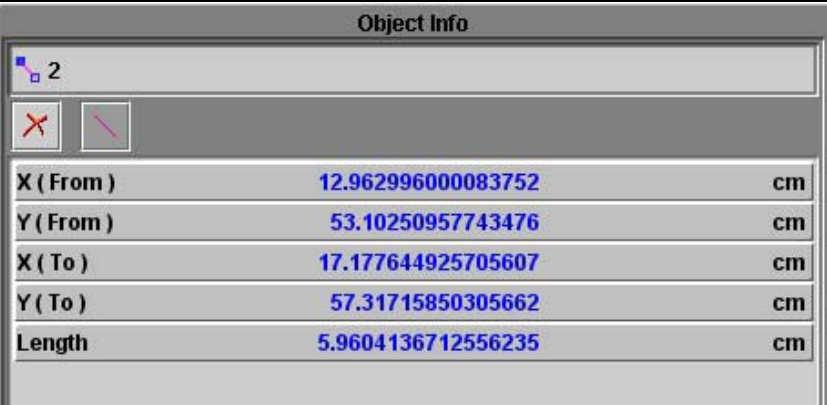
²³ Der Umgang mit dem Textfeld ist im Abschnitt „Messobjekt - Object Info“ auf Seite 18 beschrieben.

²⁴ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

Verbindungsline der beiden Punkte „anfasst“, kann das gesamte Objekt, also beide Punkte gleichzeitig, verschoben werden.

Anmerkung: Das ausgefüllte Quadrat markiert den Anfangspunkt.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info
 Delete  Print ...  Rename ☒  Show Connection	

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Delete	Löscht das Messobjekt nach Bestätigung einer Sicherheitsabfrage.
	Print...	Druckt die „Object Info“ aus.
	Rename	Zeigt ein Textfeld ²⁵ zum Editieren des Objekt-Namen an.
	Show Connection	<i>Eingeschaltet:</i> Zeichnet eine durchgezogene Verbindungsline zwischen Anfangs- und Endpunkt der Strecke. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Verbindungsline wird gestrichelt eingezeichnet.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
X (From)	x -Koordinate des Anfangspunktes	cm
Y (From)	y -Koordinate des Anfangspunktes	cm
X (To)	x -Koordinate des Endpunktes	cm
Y (To)	y -Koordinate des Endpunktes	cm
Length	Abstand zwischen Anfangs- und Endpunkt	cm

Datenbereich – Versuchsaufgaben²⁶

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
--	--	--

²⁵ Der Umgang mit dem Textfeld ist im Abschnitt „Messobjekt - Object Info“ auf Seite 18 beschrieben.

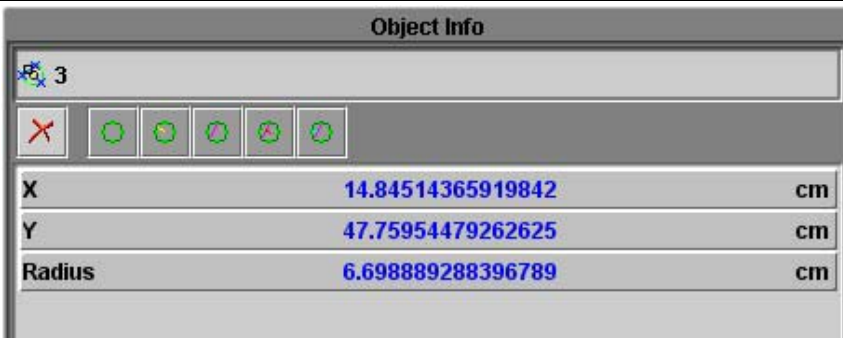
²⁶ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

Anmerkung: Da dieses Objekt nicht unmittelbar für das Bearbeiten von Versuchsaufgaben eingesetzt wird, werden hier keine Daten angezeigt.

2.3.3 Circle

Der ursprünglich geplante Einsatzbereich für dieses Objekt war die Krümmungsmessung nach der Sagitta-Methode. Da die Bestimmung der Krümmung mittlerweile auf eine andere, für den Benutzer komfortablere Weise gelöst wurde, wird dieses Objekt nur noch für Kontrollmessungen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen des Versuchs wird es aber nicht verwendet.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info
 Delete  Print ...  Rename ☒  Show Radius ☒  Show Circle ☒  Show Secant ☒  Show Vertical ☒  Show Extension	

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Delete	Löscht das Messobjekt nach Bestätigen einer Sicherheitsabfrage.
	Print...	Druckt die „Object Info“ aus.
	Rename	Zeigt ein Textfeld ²⁷ zum Editieren des Objekt-Namen an.
	Show Radius	<i>Eingeschaltet:</i> Zeichnet eine durchgezogene Linie zwischen dem Mittelpunkt M des Kreises und dem Kreispunkt b . <i>Ausgeschaltet:</i> Die Verbindungslinie wird gestrichelt eingezeichnet.
	Show Circle	<i>Eingeschaltet:</i> Zeichnet den Kreis als durchgezogene Linie. <i>Ausgeschaltet:</i> Der Kreis wird gestrichelt eingezeichnet.
	Show Secant	<i>Eingeschaltet:</i> Zeichnet die Sekante l zwischen den Kreispunkten a und c als durchgezogene Linie ein. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Sekante wird gestrichelt eingezeichnet.

²⁷ Der Umgang mit dem Textfeld ist im Abschnitt „Messobjekt - Object Info“ auf Seite 18 beschrieben.

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Show Vertical	<i>Eingeschaltet:</i> Verbindet den Mittelpunkt m der Sekante und den Mittelpunkt M des Kreises mit einer durchgezogenen Linie. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Verbindungslinie wird gestrichelt eingezeichnet.
	Show Extension	<i>Eingeschaltet:</i> Die Verbindung d zwischen dem Kreispunkt b und dem Mittelpunkt m der Sekante l wird als durchgezogene Linie eingezeichnet. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Verbindungslinie wird gestrichelt eingezeichnet.

Anmerkung: Die Bezeichnungen der ausgezeichneten Punkte im Objekt orientiert sich an der Beschriftung von Abbildung 31 auf Seite 52.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
X	x -Koordinate des Mittelpunktes	cm
Y	y -Koordinate des Mittelpunktes	cm
Radius	Radius des Kreises	cm

Datenbereich – Versuchsaufgaben²⁸

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
--	--	--

Anmerkung: Da dieses Objekt nicht unmittelbar für das Bearbeiten von Versuchsaufgaben eingesetzt wird, werden hier keine Daten angezeigt.

2.3.4 Ruler

Über das Ruler-Objekt wird der Messbereich durch Vorgabe eines oberen und eines unteren Randes eingestellt. Interaction-Objekte, die außerhalb des Messbereichs liegen, gehen nicht in die Berechnung des Wirkungsquerschnitts und die Statistik ein.

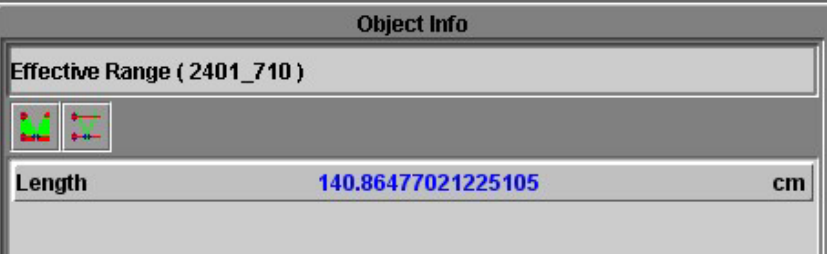
Die Lage des oberen und unteren Randes des Messbereichs kann jeweils über eine, auf der linken Seite angebrachte, vertikal verschiebbare Node eingestellt werden.

Auf dem unteren Rand befindet sich eine weitere Node, mit deren Hilfe die horizontale Position des eingezeichneten Winkels verstellt werden kann. Der Winkel öffnet sich nach links und rechts um jeweils 3° . Indem man die horizontal verschiebbare Node des Winkels auf einer Spur platziert, kann man überprüfen, ob ihr Verlauf um mehr als 3° von der vertikal verlaufenden Strahlachse abweicht.

²⁸ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

WICHTIG: Änderungen am Messbereich, also der Position des oberen und unteren Randes, wirken sich, im Gegensatz zu Änderungen an den visuellen Einstellungen wie z.B. dem Einfärben der Flächen, auf alle Karteikarten bzw. Blasenkammeraufnahmen aus.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info
	

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Show Areas	<i>Eingeschaltet:</i> Die Flächen, die außerhalb des Winkels liegen, werden eingefärbt (grün). Ebenfalls eingefärbt (rot) werden die Flächen, die außerhalb des Messbereiches liegen. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Flächen werden nicht eingefärbt.
	Show Lines	<i>Eingeschaltet:</i> Die Begrenzungslinien des Winkels und des Messbereichs werden als durchgezogene Linien dargestellt. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Begrenzungslinien werden gestrichelt eingezeichnet.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
Length	Gibt die Länge des Messbereichs, also den Abstand zwischen seiner unteren und der oberen Begrenzung, an.	cm

Datenbereich – Versuchsaufgaben²⁹

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
Task 1	Effective Range	Gibt die Länge des Messbereichs, also den Abstand zwischen seiner unteren und oberen Begrenzung, an.

2.3.5 Track

Die Track-Objekte werden zur Bearbeitung der zweiten Versuchsaufgabe bzw. des ersten Teils dieser Aufgabe, zur Verfügung gestellt. Sie ermöglichen es nicht nur, die Länge ge-

²⁹ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

krümmter Spuren zu bestimmen, sondern auch den Anfangsimpuls des beteiligten Teilchens zu berechnen.

Der Impuls wird auf zwei verschiedenen Wegen ermittelt. Sobald drei oder mehr Nodes zur Verfügung stehen, erfolgt die Berechnung automatisch über die Krümmung der Spur³⁰. Unabhängig von der Anzahl der verwendeten Nodes kann die Berechnung über die Länge der Spur, also die Reichweite³¹ des verursachenden Teilchens, erfolgen. Um aus der Reichweite den korrekten Impuls bestimmen zu können, muss dem Objekt allerdings mitgeteilt werden um welche Art von Teilchen (p , μ , π , K) es sich handelt. – Hier ist die Entscheidung des Benutzers gefragt, der einen der verfügbaren Typen aus der Liste auswählen muss.

Zur genaueren Bestimmung der Spurlänge können beliebig viele Nodes eingefügt werden, um so den Verlauf der Spur möglichst genau annähern zu können. Die Nodes können mit „Add Node“ oder durch aktivieren des Einfüge-Modus hinzugefügt werden.

Weiterhin kann die Tiefe der Anfangs- und Endpunkte bestimmt werden, um so auch den dreidimensionalen Verlauf³², anstatt der Projektion in die Ebene, rekonstruieren zu können.

Anmerkung: Das ausgefüllte Quadrat markiert den Anfangspunkt der Spur bzw. die Position dieses Punktes in der zweiten Ansicht. Der ausgefüllte Kreis des Markers wird an die Position der beiden überlagerten Markierungen von der Vorderseite der Blaskammer verschoben. Die beiden anderen Kreise werden so platziert, dass sie die Lage der Markierung an der Kammerrückseite in den beiden Views vermessen.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info
Delete Print ... Rename ☒ Show Traverse ☐ Show Projection ☐ Show Marker ☒ Show Connection Add Node Delete Node ☐ Insert Mode Particle	Object Info # Nodes 2 Depth (From) 18.20803394109315 cm Depth (To) 18.20803394109316 cm Length (2D) 5.9604136712556235 cm Length (3D) 5.9604136712556235 cm Bow Length (2D) NaN cm Bow Length (3D) NaN cm Particle D

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Delete	Löscht das Messobjekt nach Bestätigen einer Sicherheitsabfrage.
	Print...	Druckt die „Object Info“ aus.

³⁰ Siehe Abschnitt „Impuls aus der Krümmung“ auf Seite 62.

³¹ Siehe Abschnitt „Impuls aus der Reichweite“ auf Seite 63.

³² Siehe Abschnitt „Tiefe eines Spurpunktes“ auf Seite 51.

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Rename	Zeigt ein Textfeld ³³ zum Editieren des Objekt-Namen an.
	Show Traverse	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet die Spur (Nodes und Verbindungslinien) ein. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Spur aus.
	Show Projection	<i>Eingeschaltet:</i> Markiert die Position von Anfangs- und Endpunkt in einem anderen View. Diese Funktion wird zur Tiefenbestimmung der Spurpunkte nach dem Stereo-Shift-Verfahren benötigt. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Positionen aus.
	Show Marker	<i>Eingeschaltet:</i> Mit diesem Objekt werden die für das Stereo-Shift-Verfahren ³⁴ benötigten drei Positionen von Markierungen auf der Vorder- und Rückseite der Blaskammer festgelegt. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Markierungen aus.
	Show Connection	<i>Eingeschaltet:</i> Die Verbindungslinie zwischen den Nodes der Spur werden als durchgezogene Linien dargestellt. Dies bezieht sich allerdings nicht auf die Verbindung zwischen dem Anfangs- und Endpunkt, sie wird immer gestrichelt eingezeichnet. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Verbindung wird gestrichelt eingezeichnet.
	Add Node	Fügt der Spur eine neue Node an der Position des Kontext-Menüs hinzu. Als Position werden die Koordinaten der linken oberen Ecke des Menüs verwendet. Durch Drücken der Plus-Taste wird zwischen der aktuell aktiven und der nächsten Node auf halber Strecke eine neue Node eingefügt.
	Delete Node	Entfernt die Node, welche sich an der Position des Kontext-Menüs befindet, aus der Spur. Diese Funktion steht nur dann zur Verfügung, wenn der Track aus mehr als zwei Nodes besteht. Drücken der Minus-Taste erzielt bei einer aktiven Node dieselbe Wirkung.
	Insert Mode	<i>Eingeschaltet:</i> Der Einfüge-Modus ist aktiv. Jeder Klick mit der Maus fügt der Spur eine neue Node an der Position des Mauszeigers hinzu. Im Einfüge-Modus können nur die Nodes der Spur, jedoch keine anderen Messobjekte verschoben oder aktiviert werden. Der aktive Einfüge-Modus wird durch eine spezielle Form des Mauszeigers ³⁵ signalisiert. <i>Ausgeschaltet:</i> Alle Messobjekte, sowie der Mauszeiger, verhalten sich wieder wie gewohnt.

³³ Der Umgang mit dem Textfeld ist im Abschnitt „Messobjekt - Object Info“ auf Seite 18 beschrieben.

³⁴ Siehe Abschnitt „Stereo-Shift-Verfahren“ auf Seite 50.

³⁵ Siehe Tabelle 3 auf Seite 26.

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
✖	Particle	Dieses Untermenü listet eine Reihe von Teilchentypen auf, von denen einer der Spur zugewiesen werden kann.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
# Nodes	Anzahl der Nodes aus denen sich die Spur zusammensetzt (≥ 2).	--
Depth (From)	z -Koordinate des Anfangspunktes der Spur.	cm
Depth (To)	z -Koordinate des Endpunktes der Spur.	cm
Length (2D)	Länge ³⁶ der in die Kameraebene projizierten Spur.	cm
Length (3D)	Länge ³⁶ der dreidimensional rekonstruierten Spur.	cm
Bow Length (2D)	Optimierte Länge ³⁶ der in die Kameraebene projizierten Spur.	cm
Bow Length (3D)	Optimierte Länge ³⁶ der dreidimensional rekonstruierten Spur.	cm
Particle	Der hier zugewiesene Teilchentyp wird für die Bestimmung des Impulses aus der Reichweite benötigt.	--

Datenbereich – Versuchsaufgaben³⁷

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
Task 2	Track	Dieses Feld dient dazu ein Track-Objekt zur Vermessung eines Pions bzw. Müons auszuwählen. Das Objekt muss dazu bereits im Arbeitsbereich eingefügt und als Teilchentyp Pion bzw. Müon eingestellt worden sein. Doppelklicken auf die Beschriftung des Auswahlfeldes macht die Karteikarte auf der sich das aktuell gewählte Track-Objekt befindet sichtbar und wählt das Objekt aus.
Task 2	Momentum	Impuls In dieser Tabelle werden der Impulsbetrag, die Impulskomponenten und der Radius für die einzelnen Abschnitte angezeigt, in die das Track-Objekt die auslaufende Spur zerlegt. Die Impulse werden über die Krümmung bzw. den Radius bestimmt. Doppelklicken auf eine der Tabellenzeilen macht die Karteikarte auf der sich das Track-Objekt befindet sichtbar und wählt die zugehörige Node aus.
	From Curvature	Impulsbetrag des ersten Abschnitts (vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen) im Track-Objekt. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.

³⁶ Siehe Abschnitt „Spurlänge“ auf Seite 56.

³⁷ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
	From Range	Betrag des Impulses am Wechselwirkungspunkt, wie er sich aus der Reichweite ³⁸ des Teilchens ergibt. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Difference	Betrag der Impulsdifferenz zwischen den beiden Impulsvektoren, die aus der Krümmung und der Reichweite berechnet wurden. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.

2.3.6 Interaction

Mit Hilfe des Interaction-Objekts werden zur Bestimmung des Wirkungsquerschnittes und der Multiplizität primäre Wechselwirkungspunkte auf den Blasenkammeraufnahmen markiert und gezählt. Zum Erstellen eines Strahlprofils kann zusätzlich die Tiefe der Wechselwirkung nach dem Stereo-Shift-Verfahren bestimmt werden. Diese Funktionen werden zur Bearbeitung der ersten Versuchsaufgabe benötigt.

Außerdem können Interaction-Objekte im Rahmen des zweiten Teils der zweiten Versuchsaufgabe einem V^0 -Objekt als Primärvertex zugewiesen werden. Um in diesem Zusammenhang weitere Daten zur Erstellung einer Teilchenhypothese zu gewinnen, kann bei elastischen Wechselwirkung mit zwei auslaufenden Spuren der Impuls dieser beiden Spuren und ihr Winkel bezüglich der einlaufenden Spur ermittelt werden. Zu diesem Zweck sind drei Track-Objekte, deren Bedienung im letzten Abschnitt beschrieben wurde, in das Interaction-Objekt integriert.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info																	
 Delete  Print ...  Rename ☐  Show Track In ☐  Show Projection ☐  Show Marker ☐  Show Coord System  Incoming Track  Multiplicity  Conversions ☐  Is Elastic ☐  Beam Profile Only	Object Info  1      Vertex <table><tr><td>X</td><td>10,15</td><td>cm</td></tr><tr><td>Y</td><td>10,15</td><td>cm</td></tr><tr><td>Depth</td><td>18,21</td><td>cm</td></tr></table> Interaction <table><tr><td>Multiplicity</td><td>2</td></tr><tr><td>Conversions</td><td>0</td></tr><tr><td>Is Elastic</td><td>☐</td></tr><tr><td>Beam Profile Only</td><td>☐</td></tr></table>	X	10,15	cm	Y	10,15	cm	Depth	18,21	cm	Multiplicity	2	Conversions	0	Is Elastic	☐	Beam Profile Only	☐
X	10,15	cm																
Y	10,15	cm																
Depth	18,21	cm																
Multiplicity	2																	
Conversions	0																	
Is Elastic	☐																	
Beam Profile Only	☐																	

³⁸ Siehe Abschnitt „Impuls aus der Reichweite“ auf Seite 63.

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Delete	Löscht das Messobjekt nach Bestätigen einer Sicherheitsabfrage.
	Print...	Druckt die „Object Info“ aus.
	Rename	Zeigt ein Textfeld ³⁹ zum Editieren des Objekt-Namen an.
	Show Track In	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet ein Track-Objekt zum Vermessen der einlaufenden Spur ein. Die Informationen zu diesem Objekt werden in den Datenbereich der „Object Info“ integriert⁴⁰. Das Kontext-Menü des Track-Objekts steht als Untermenü „Incoming Track“ zu diesem Menü zur Verfügung. <i>Ausgeschaltet:</i> Das Track-Objekt wird nicht angezeigt.
	Show Projection	<i>Eingeschaltet:</i> Markiert die Position des Anfangspunktes der einlaufenden Spur, sowie den Vertex und die Endpunkte der auslaufenden Spuren in einem anderen View. Diese Funktion wird zur Tiefenbestimmung der Spurpunkte nach dem Stereo-Shift-Verfahren⁴¹ benötigt. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Positionen aus.
	Show Marker	<i>Eingeschaltet:</i> Mit diesem Objekt werden die für das Stereo-Shift-Verfahren benötigten drei Positionen von Markierungen auf der Vorder- und Rückseite der Blaskammer festgelegt. Es ersetzt die einzelnen Marker-Objekte der drei Track-Objekte. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Markierungen aus.
	Show Coord System	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet ein kartesisches Koordinatensystem ein, dessen Ursprung im Vertex der Wechselwirkung liegt. Die x-Achse des Koordinatenkreuzes weist in dieselbe Richtung wie die einlaufende Spur. <i>Ausgeschaltet:</i> Das Koordinatensystem wird nicht angezeigt.
	Incoming Track	Untermenü in dem Einstellungen an der einlaufenden Spur bzw. an dem die Spur repräsentierenden Track-Objekt vorgenommen werden können. Das Menü entspricht dem Kontext-Menü eines Track-Objekts und ist nur aktiviert, falls die zugehörige Spur eingeblendet ist. In die einlaufende Spur können keine zusätzlichen Nodes eingefügt werden.

³⁹ Der Umgang mit dem Textfeld ist im Abschnitt „Messobjekt - Object Info“ auf Seite 18 beschrieben.

⁴⁰ Siehe Abbildung 25 auf Seite 40.

⁴¹ Siehe Abschnitt „Stereo-Shift-Verfahren“ auf Seite 50.

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Multiplicity	Untermenü in dem ein Wert für die beobachtete Multiplizität ausgewählt werden kann. Es handelt sich dabei um die Anzahl der Teilchenspuren, die vom Wechselwirkungspunkt wegführen. Aus den hier eingestellten Werten berechnet die Software die im ersten Versuchsteil gefragte Multiplizität ⁴² .
	Conversions	Untermenü in dem ein Wert für die Anzahl der konvertierten γ -Quanten, die der Wechselwirkung assoziiert sind, ausgewählt werden kann. Mit diesem Wert wird die mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen ⁴³ geschätzt.
	Is Elastic	<i>Eingeschaltet:</i> Mit der Einstellung dieses Menüpunktes kann der Benutzer angeben, dass es sich hier um eine elastische Wechselwirkung handelt. Der Eintrag ist nur aktiv, falls bei der Multiplizität der Wert 2 und bei den Konversionen der Wert 0 eingestellt wurde. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Wechselwirkung geht als inelastisch in die Berechnungen ein.
	Beam Profile Only	<i>Eingeschaltet:</i> Dieser Menüpunkt entscheidet darüber, ob die Wechselwirkung in die Berechnung des Wirkungsquerschnitts bzw. der Multiplizität eingeht, oder ob sie ausschließlich zum Erstellen des Strahlprofils verwendet wird. Damit ist es z.B. möglich δ -Elektronen zur Vermessung des Strahlprofils zu verwenden, ohne dabei die Ergebnisse für die Multiplizität und den Wirkungsquerschnitt zu verfälschen. Wenn dieser Eintrag aktiviert ist, kann weder das Koordinatensystem noch die einlaufende Spur eingeblendet werden. <i>Ausgeschaltet:</i> Entfernt alle Beschränkungen.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
Vertex		
X	x-Koordinate des Vertex	cm
Y	y-Koordinate des Vertex	cm
Depth	z-Koordinate des Vertex	cm
Interaction		
Multiplicity	In diesem Auswahlfeld kann aus einer Liste ein Wert für die beobachtete Multiplizität ausgewählt werden. Es handelt sich dabei um die Anzahl der Teilchenspuren, die vom Wechselwirkungspunkt wegführen. Aus den hier eingestellten Werten berechnet die Software die im ersten Versuchsteil gefragte Multiplizität ⁴⁴ .	--

⁴² Siehe Abschnitt „Mittlere geladene Multiplizität“ auf Seite 60.

⁴³ Siehe Abschnitt „Mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen“ auf Seite 60.

⁴⁴ Siehe Abschnitt „Mittlere geladene Multiplizität“ auf Seite 60.

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
Conversions	In diesem Auswahlfeld kann aus einer Liste ein Wert für die Anzahl der konvertierten Photonen, die der Wechselwirkung assoziiert sind, ausgewählt werden. Mit diesem Wert wird die mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen ⁴⁵ geschätzt.	--
Is Elastic	<i>Eingeschaltet:</i> Mit der Einstellung dieses Auswahlfeldes kann der Benutzer angeben, dass es sich hier um eine elastische Wechselwirkung handelt. Das Feld ist nur aktiv, falls bei der Multiplizität der Wert 2 und bei den Konversionen der Wert 0 eingestellt wurde. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Wechselwirkung geht als ineastisch in die Berechnungen ein.	--
Beam Profile Only	<i>Eingeschaltet:</i> Dieses Auswahlfeld entscheidet darüber, ob die Wechselwirkung in die Berechnung des Wirkungsquerschnitts bzw. der Multiplizität eingeht, oder ob sie ausschließlich zum Erstellen des Strahlprofils verwendet wird. Damit ist es z.B. möglich δ-Elektronen zur Vermessung des Strahlprofils zu verwenden, ohne dabei die Ergebnisse für die Multiplizität und den Wirkungsquerschnitt zu verfälschen. Wenn das Feld aktiviert ist, kann weder das Koordinatensystem noch die einlaufende Spur eingeblendet werden. <i>Ausgeschaltet:</i> Entfernt alle Beschränkungen.	--

Anmerkung: Sobald man das integrierte Track-Objekte einblendet, wird dessen „Object Info“ in die Messwert-Anzeige der „Object Info“ des Interaction-Objekts eingefügt.

⁴⁵ Siehe Abschnitt „Mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen“ auf Seite 60.

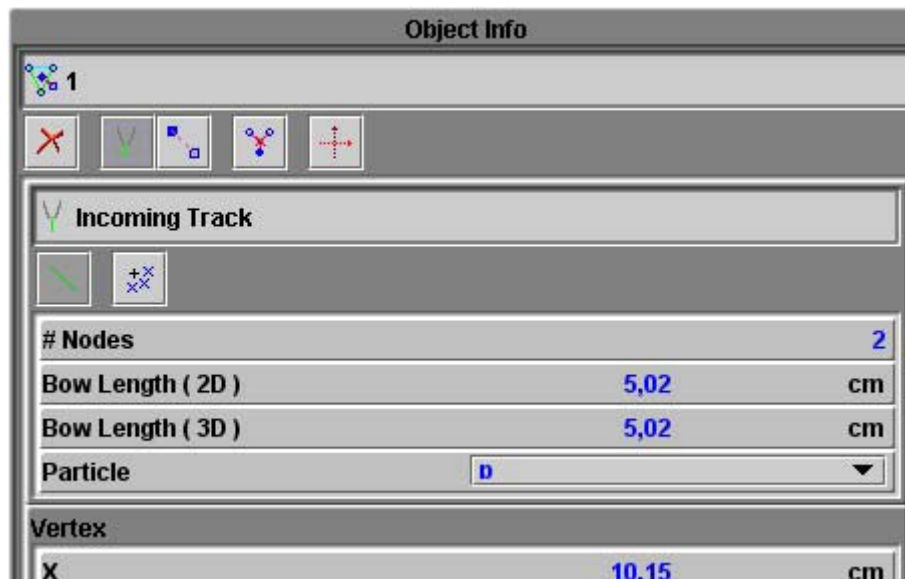


Abbildung 25: Integration der „Object Info“ eines Tracks in die Messwert-Anzeige

Datenbereich – Versuchsaufgaben⁴⁶

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
Task 1	# Interactions	Wechselwirkungen
	Total	Anzahl aller Wechselwirkungen die im Messbereich liegen.
	Elastic	Anzahl derjenigen Wechselwirkungen im Messbereich, die als elastisch markiert wurden.
	Inelastic	Differenz zwischen den beiden obigen Werten.
Task 1	Cross Section	Wirkungsquerschnitt ⁴⁷
	Total	Totaler Wirkungsquerschnitt.
	Elastic	Elastischer Wirkungsquerschnitt.
Task 1	Beam Profile	Strahlprofil
	--	In dieser Liste sind die Tiefen (z -Koordinaten) aller Wechselwirkungen im Messbereich aufgelistet. Doppelklicken auf einen der Listeneinträge macht die Karteikarte auf der sich das Interaction-Objekt befindet sichtbar und wählt das Objekt aus.
Task 1	Multiplicity	Multiplizität ⁴⁸
	Mean Charged	Geladene Multiplizität
	Arithmetic Mean	Arithmetisches Mittel der Werte für die Multiplizität, die bei den einzelnen Interaction-Objekten eingestellt wurden.
	Mean Square Deviation	Mittlere quadratische Abweichung vom arithmetischen Mittelwert.
	Estimate Mean Of Pizero	Schätzwert für Multiplizität der neutralen Pionen.
	From Conversion	Berechnet aus der Anzahl der beobachteten Konversionen.
	From Mean Charged	Abgeleitet aus der mittleren geladenen Multiplizität.

⁴⁶ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

⁴⁷ Siehe Abschnitt „Wirkungsquerschnitt“ auf Seite 59.

⁴⁸ Siehe Abschnitt „Multiplizität“ auf Seite 60.

2.3.7 Vzero - V^0

Das V^0 -Objekt entspricht weitestgehend dem Interaction-Objekt. Allerdings wird es nicht für die Vermessung primärer Wechselwirkungen verwendet, sondern für die sekundärer Wechselwirkungspunkte, in denen beim Zerfall eines neutralen Teilchens zwei sichtbare Spuren entstehen, die eine V-förmige Figur bilden⁴⁹. Aufgrund der großen Übereinstimmung mit dem Interaction-Objekt werden sich in diesem Abschnitt einige Erklärungen wiederholen.

Es besteht die Möglichkeit das V^0 -Objekt mit dem Interaction-Objekt zu koppeln, das den vermutlich assoziierten Primärvertex repräsentiert.

Notwendig werden solche Messungen bei der Bearbeitung der zweiten Versuchsaufgabe bzw. des zweiten Teils der Aufgabe.

Steuerelemente

Kontext-Menü	Object Info																											
 Delete  Print ... A B Rename  Show Track In  Show Track A  Show Track B  Show Projection  Show Marker  Show Coord System  Incoming Track ▶  Outgoing Track A ▶  Outgoing Track B ▶  Interaction ▶	Object Info  2        Vertex <table><tr><td>X</td><td>10,15</td><td>cm</td></tr><tr><td>Y</td><td>10,15</td><td>cm</td></tr><tr><td>Depth</td><td>18,21</td><td>cm</td></tr></table> Angle <table><tr><td>Outgoing Track A</td><td>0,79</td><td>rad</td></tr><tr><td>Outgoing Track B</td><td>0,79</td><td>rad</td></tr><tr><td>Outgoing Tracks Sum</td><td>0,00</td><td>rad</td></tr></table> Assigned Interaction Interaction <table><tr><td>Angle</td><td>NaN</td><td>rad</td></tr><tr><td>Distance (2D)</td><td>5,02</td><td>cm</td></tr><tr><td>Distance (3D)</td><td>5,02</td><td>cm</td></tr></table>	X	10,15	cm	Y	10,15	cm	Depth	18,21	cm	Outgoing Track A	0,79	rad	Outgoing Track B	0,79	rad	Outgoing Tracks Sum	0,00	rad	Angle	NaN	rad	Distance (2D)	5,02	cm	Distance (3D)	5,02	cm
X	10,15	cm																										
Y	10,15	cm																										
Depth	18,21	cm																										
Outgoing Track A	0,79	rad																										
Outgoing Track B	0,79	rad																										
Outgoing Tracks Sum	0,00	rad																										
Angle	NaN	rad																										
Distance (2D)	5,02	cm																										
Distance (3D)	5,02	cm																										

Einstellungen

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Delete	Löscht das Messobjekt nach Bestätigen einer Sicherheitsabfrage.
	Print...	Druckt die „Object Info“ aus.
	Rename	Zeigt ein Textfeld ⁵⁰ zum Editieren des Objekt-Namen an.

⁴⁹ Siehe Abschnitt „Glossar“ auf Seite 69.

⁵⁰ Der Umgang mit dem Textfeld ist im Abschnitt „Messobjekt - Object Info“ auf Seite 18 beschrieben.

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Show Track In	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet ein Track-Objekt zum Vermessen der einlaufenden Spur ein. Dem Objekt können keine Nodes hinzugefügt werden. Bei Assoziation mit einem Interaction-Objekts verläuft diese Spur automatisch zwischen den Vertices der beiden Objekte und kann nur noch durch das Verschieben dieser Vertices beeinflusst werden. Die Informationen zu diesem Objekt werden in den Datenbereich der „Object Info“ integriert⁵¹. Das Kontext-Menü des Track-Objekts steht als Untermenü „Incoming Track“ zu diesem Menü zur Verfügung. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Spur wird nicht angezeigt. Falls ein Interaction-Objekt assoziiert ist und angezeigt wird, wird die Spur als gestrichelte Linie angezeigt.
	Show Track A	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet ein Track-Objekt zum Vermessen der ersten der beiden auslaufenden Spuren ein. Die Informationen zu diesem Objekt werden in den Datenbereich der „Object Info“ integriert. Das Kontext-Menü des Track-Objekts steht als Untermenü „Outgoing Track A“ zu diesem Menü zur Verfügung. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Spur wird nicht angezeigt.
	Show Track B	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet ein Track-Objekt zum Vermessen der zweiten der beiden auslaufenden Spuren ein. Die Informationen zu diesem Objekt werden in den Datenbereich der „Object Info“ integriert. Das Kontext-Menü des Track-Objekts steht als Untermenü „Outgoing Track B“ zu diesem Menü zur Verfügung. <i>Ausgeschaltet:</i> Die Spur wird nicht angezeigt.
	Show Projection	<i>Eingeschaltet:</i> Markiert die Position des Anfangspunktes der einlaufenden Spur, sowie den Vertex und die Endpunkte der auslaufenden Spuren in einem anderen View. Diese Funktion wird zur Tiefenbestimmung der Spurpunkte nach dem Stereo-Shift-Verfahren⁵² benötigt. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Positionen aus.

⁵¹ Siehe Abbildung 25 auf Seite 40.

⁵² Siehe Abschnitt „Stereo-Shift-Verfahren“ auf Seite 50.

Icon	Bezeichnung	Erläuterung
	Show Marker	<i>Eingeschaltet:</i> Mit diesem Objekt werden die für das Stereo-Shift-Verfahren benötigten drei Positionen von Markierungen auf der Vorder- und Rückseite der Blaskammer festgelegt. Es ersetzt die einzelnen Marker-Objekte der drei Track-Objekte. <i>Ausgeschaltet:</i> Blendet die Markierungen aus.
	Show Coord System	<i>Eingeschaltet:</i> Blendet ein kartesisches Koordinatensystem ein, dessen Ursprung im Vertex der Wechselwirkung liegt. Die x-Achse des Koordinatenkreuzes weist in dieselbe Richtung wie die einlaufende Spur. <i>Ausgeschaltet:</i> Das Koordinatensystem wird nicht angezeigt.
	Incoming Track	Untermenü in dem Einstellungen an der einlaufenden Spur bzw. an dem die Spur repräsentierenden Track-Objekt vorgenommen werden können. Das Menü entspricht dem Kontext-Menü eines Track-Objekts und ist nur aktiviert, falls die zugehörige Spur eingeblendet ist. In die einlaufende Spur können keine zusätzlichen Nodes eingefügt werden.
	Outgoing Track A	Untermenü, in dem Einstellungen an der ersten der beiden auslaufenden Spuren bzw. an dem die Spur repräsentierenden Track-Objekt vorgenommen werden können. Das Menü entspricht dem Kontext-Menü eines Track-Objekts und ist nur aktiviert, falls die zugehörige Spur eingeblendet ist.
	Outgoing Track B	Untermenü in dem Einstellungen an der zweiten der beiden auslaufenden Spuren bzw. an dem die Spur repräsentierenden Track-Objekt vorgenommen werden können. Das Menü entspricht dem Kontext-Menü eines Track-Objekts und ist nur aktiviert, falls die zugehörige Spur eingeblendet ist.
	Interaction	In diesem Untermenü werden die vorhandenen Interaction-Objekte, mit denen das V^0-Objekt verbunden werden kann, zur Auswahl angezeigt. Durch Klicken auf einen Eintrag wird das entsprechende Interaction-Objekt als assoziierter Primärvertex verwendet. Bei zugewiesenem Interaction-Objekt wird das Marker-Objekt des V^0-Objekts deaktiviert und ausgeblendet. Anstatt dessen wird das Marker-Objekt des zugewiesenen Interaction-Objekts verwendet.

Messwerte

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
Vertex		
X	x -Koordinate des Vertex	cm
Y	y -Koordinate des Vertex	cm
Depth	z -Koordinate des Vertex	cm
Angle		

Bezeichnung	Erläuterung	Einheit
Outgoing Track A	Winkel zwischen dem Impulsvektor der einlaufenden Spur und dem Impulsvektor der ersten der beiden auslaufenden Spuren.	rad
Outgoing Track B	Winkel zwischen dem Impulsvektor der einlaufenden Spur und dem Impulsvektor der zweiten der beiden auslaufenden Spuren.	rad
Outgoing Tracks Sum	Winkel zwischen dem Impulsvektor der einlaufenden Spur und der Vektorsumme der Impulsvektoren der beiden auslaufenden Spuren.	rad
Assigned Interaction		
Interaction	In diesem Auswahlfeld kann aus einer Liste ein Interaction-Objekt ausgewählt werden, welches dann als assoziierter Primärvertex verwendet wird. Bei zugewiesenem Interaction-Objekt wird das Marker-Objekt des V^0 -Objekts deaktiviert und ausgeblendet. Anstatt dessen wird das Marker-Objekt des zugewiesenen Interaction-Objekts verwendet. Doppelklicken auf die Beschriftung wechselt zum Interaction-Objekt.	--
Angle	Winkel zwischen dem Koordinatensystem des V^0 -Objekts und dem des assoziierten Interaction-Objekts.	rad
Distance (2D)	Länge ⁵³ der in die Kameraebene projizierten einlaufenden Spur.	cm
Distance (3D)	Länge ⁵⁶ der dreidimensionalen einlaufenden Spur.	cm

Datenbereich – Versuchsaufgaben⁵⁴

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
Task 1	V^0_s	Liste der V^0 -Objekte.
	--	In dieser Liste sind alle V^0 -Objekte aufgeführt. Es wird nicht nur der Name angezeigt, der dem Objekt zugewiesen wurde, sondern auch die Karteikarte bzw. Blaskammeraufnahme, auf der das Objekt eingefügt wurde. Doppelklicken auf einen der Listeneinträge macht die Karteikarte auf der sich das V^0 -Objekt befindet sichtbar und wählt das Objekt aus.
Task 3	V^0	Dieses Feld erlaubt die Auswahl eines V^0 -Objekts. Zu diesem Objekt werden dann die Daten angezeigt, die man zur Bearbeitung der dritten Versuchsaufgabe benötigt. Es wird sowohl der Name des Objekts, als auch die Bezeichnung der zugehörigen Blaskammeraufnahme bzw. Karteikarte angezeigt. Doppelklicken auf die Beschriftung des Auswahlfeldes macht die Karteikarte auf der sich das aktuell gewählte V^0 -Objekt befindet sichtbar und wählt das Objekt aus.

⁵³ Siehe Abschnitt „Spurlänge“ auf Seite 56.

⁵⁴ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19 und Abschnitt „Screenshots“ auf Seite 70.

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
Task 3	?	Anstatt eines Fragezeichens wird an dieser Stelle der Name des V^0 -Objekts angezeigt.
	X	x -Koordinate des Sekundärvertex, den das V^0 -Objekt repräsentiert.
	Y	y -Koordinate des Sekundärvertex, den das V^0 -Objekt repräsentiert.
	Z	z -Koordinate des Sekundärvertex, den das V^0 -Objekt repräsentiert.
	Outgoing Track A	Informationen zum Unterobjekt „Outgoing Track A“. Dieses Objekt dient zur Vermessung der ersten der beiden auslaufenden Spuren. Falls das Objekt umbenannt wurde, wird hier der neue Name angezeigt.
	Length	Spurlänge, so wie sie mit dem Track-Objekt vermessen wurde.
	Angle	Winkel zwischen der Verbindungslinie von Primär- und Sekundärvertex und dem ersten Abschnitt der auslaufenden Spur.
	Momentum	Impuls
	--	In dieser Tabelle werden der Impulsbetrag, die Impulskomponenten und der Radius für die einzelnen Abschnitte angezeigt, in die das Track-Objekt die auslaufende Spur zerlegt. Die Impulse werden über die Krümmung ⁵⁵ bzw. den Radius bestimmt. Doppelklicken auf eine der Tabellenzeilen macht die Karteikarte auf der sich das Track-Objekt befindet sichtbar und wählt die zugehörige Node aus.
	From Curvature	Impulsbetrag des ersten Abschnitts (vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen) im Track-Objekt. Er wird aus der Krümmung ⁵⁶ berechnet. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	From Range	Betrag des Impulses am Wechselwirkungspunkt, wie er sich aus der Reichweite ⁵⁷ des Teilchens ergibt. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Difference	Betrag der Impulsdifferenz zwischen den beiden Impulsvektoren, die aus der Krümmung und der Reichweite berechnet wurden. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Outgoing Track B	Informationen zum Unterobjekt „Outgoing Track A“. Dieses Objekt dient zur Vermessung der ersten der beiden auslaufenden Spuren. Falls das Objekt umbenannt wurde, wird hier der neue Name angezeigt.
	Length	Spurlänge, so wie sie mit dem Track-Objekt vermessen wurde.

⁵⁵ Siehe Abschnitt „Impuls aus der Krümmung“ auf Seite 62.

⁵⁶ Siehe Abschnitt „Impuls aus der Krümmung“ auf Seite 62.

⁵⁷ Siehe Abschnitt „Impuls aus der Reichweite“ auf Seite 63.

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
	Angle	Winkel zwischen der Verbindungslinie von Primär- und Sekundärvertex und dem ersten Abschnitt der auslaufenden Spur.
	Momentum	Impuls
	--	In dieser Tabelle werden der Impulsbetrag, die Impulskomponenten und der Radius für die einzelnen Abschnitte angezeigt, in die das Track-Objekt die auslaufende Spur zerlegt. Die Impulse werden über die Krümmung bzw. den Radius bestimmt. Doppelklicken auf eine der Tabellenzeilen macht die Karteikarte auf der sich das Track-Objekt befindet sichtbar und wählt die zugehörige Node aus.
	From Curvature	Impulsbetrag des ersten Abschnitts (vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen) im Track-Objekt. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	From Range	Betrag des Impulses am Wechselwirkungspunkt, wie er sich aus der Reichweite des Teilchens ergibt. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Difference	Betrag der Impulsdifferenz zwischen den beiden Impulsvektoren, die aus der Krümmung und der Reichweite berechnet wurden. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Angle	Winkel zwischen dem Impulsvektor der einlaufenden Spur und der Vektorsumme der Impulse der beiden auslaufenden Spuren. Es handelt sich um die Impulsvektoren im Wechselwirkungspunkt.
	Momentum	Vektorsumme der Impulse der beiden auslaufenden Spuren. Wie oben handelt sich auch hier um die Impulse im Wechselwirkungspunkt.
	From Curvature	Impulsbetrag aus den Krümmungen. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	From Range	Impulsbetrag aus den Reichweiten. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Difference	Betrag der Impulsdifferenz zwischen den beiden Impulsvektoren, die aus der Krümmung und der Reichweite berechnet wurden. Wenn man den Mauszeiger über den angezeigten Wert bewegt, werden die Komponenten des zugehörigen Impulsvektors in Form eines Hinweises angezeigt.
	Primary Vertex	Informationen zum assoziierten Primärvertex
	X	x -Koordinate des Primärvertex.
	Y	y -Koordinate des Primärvertex.
	Z	z -Koordinate des Primärvertex.

Karte	Bezeichnung	Erläuterung
	Angle	Winkel zwischen den x -Achsen der Koordinatensysteme im Primär- und Sekundärvertex. Der Sekundärvertex ist derjenige Wechselwirkungspunkt, an dem das V^0 -Objekt platziert ist.
	Distance	Abstand zwischen Primär- und Sekundärvertex.

2.4 Datensicherung

Über die Menüpunkte „Load Session“ und „Save Session“ im File-Menü werden zwei Dateiauswahldialoge geöffnet. In diesen Fenstern kann eine Datei ausgewählt werden aus der Daten, die in einer früheren Sitzung gespeichert wurden geladen („Load Session“), bzw. in welche die Daten der aktuellen Sitzung gespeichert („Save Session“) werden sollen. Beim Laden von Daten einer vorangegangenen Sitzung, werden die Daten der aktuellen Sitzung durch diese komplett ersetzt, d.h. die aktuellen Daten gehen verloren, falls man sie nicht zuvor speichert. Die Daten werden in einem XML-Format gespeichert.

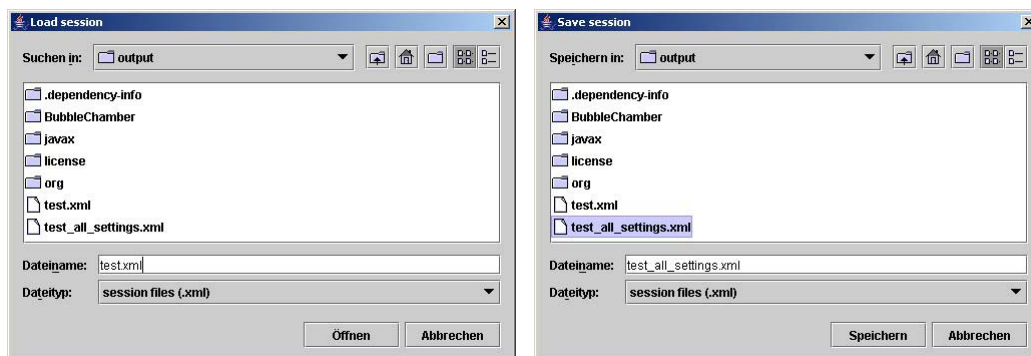


Abbildung 26: Load Session / Save Session – Dateiauswahldialoge

Der Menüpunkt „Save Report“ im File-Menü öffnet ebenfalls einen Dateiauswahldialog. In diesem Fenster kann eine Datei ausgewählt werden, in welche die aktuellen Messwerte in Form eines Reports gespeichert werden. Die Daten werden als HTML-Datei gespeichert und können über einen Browser angesehen und ausgedruckt werden.

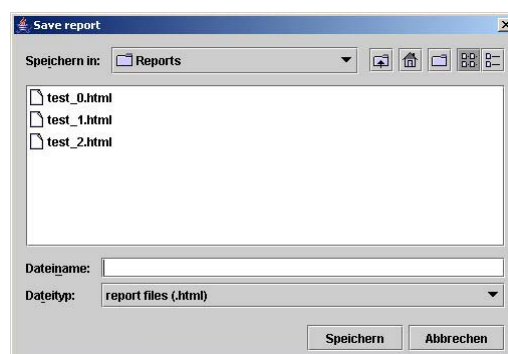


Abbildung 27: Save Report – Dateiauswahldialog

3 Auswertung

Um mit Hilfe der Blasenkammeraufnahmen physikalische Messungen durchzuführen bzw. Messwerte bestimmen zu können, sollte man sich vorher über die im Folgenden beschriebenen Methoden Gedanken machen.

3.1 Mathematik

Ein Teil dieser Methoden beruht ausschließlich auf mathematischen Verfahren und bedarf keiner physikalischen Hintergründe, wenn man von den Kenntnissen über den geometrischen Aufbau der Blasenkammer absieht.

3.1.1 Vergrößerung⁵⁸

Bei der Vergrößerung handelt es sich um die wichtigste zu ermittelnde Größe. Ohne sie kann keine physikalische Größe bestimmt werden in deren Berechnung Längenmessungen eingehen. Im Versuch sind davon hauptsächlich die Impulsmessungen betroffen. Die statistischen Betrachtungen bleiben dagegen unbeeinflusst.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Versuch am Projektionstisch wird die Vergrößerung hier bereits vorgegeben und muss nicht im Rahmen des Versuchs ermittelt werden.

Das Verfahren zur Bestimmung der Vergrößerung ist recht einfach. An den Glasscheiben der Blasenkammer sind Bezugsmarken angebracht, deren Positionen sehr genau vermessen wurden und daher bekannt sind. Diese Markierungen finden sich in Form von Kreuzen auf den Blasenkammeraufnahmen und damit auch auf den digitalisierten Bildern wieder, die von der Software verwendet werden. Um die Vergrößerung zu bestimmen, berechnet man einerseits die Abstände zwischen allen denkbaren Paaren von Bezugsmarken deren Positionen auf den Scheiben bekannt sind. Andererseits vermisst man die Positionen auf den digitalisierten Bildern und berechnet aus diesen Positionen ebenfalls die Abstände für alle möglichen Paarungen von Bezugsmarken. Trägt man nun paarweise die Abstände aus den Positionen auf den Scheiben gegen die Abstände auf den digitalisierten Aufnahmen auf, erhält man eine Gerade, deren Steigung der Umrechnungsfaktor zwischen beiden Werten ist. Dieser Umrechnungsfaktor entspricht der Vergrößerung.

⁵⁸ Siehe [1], Seiten 29 – 33.

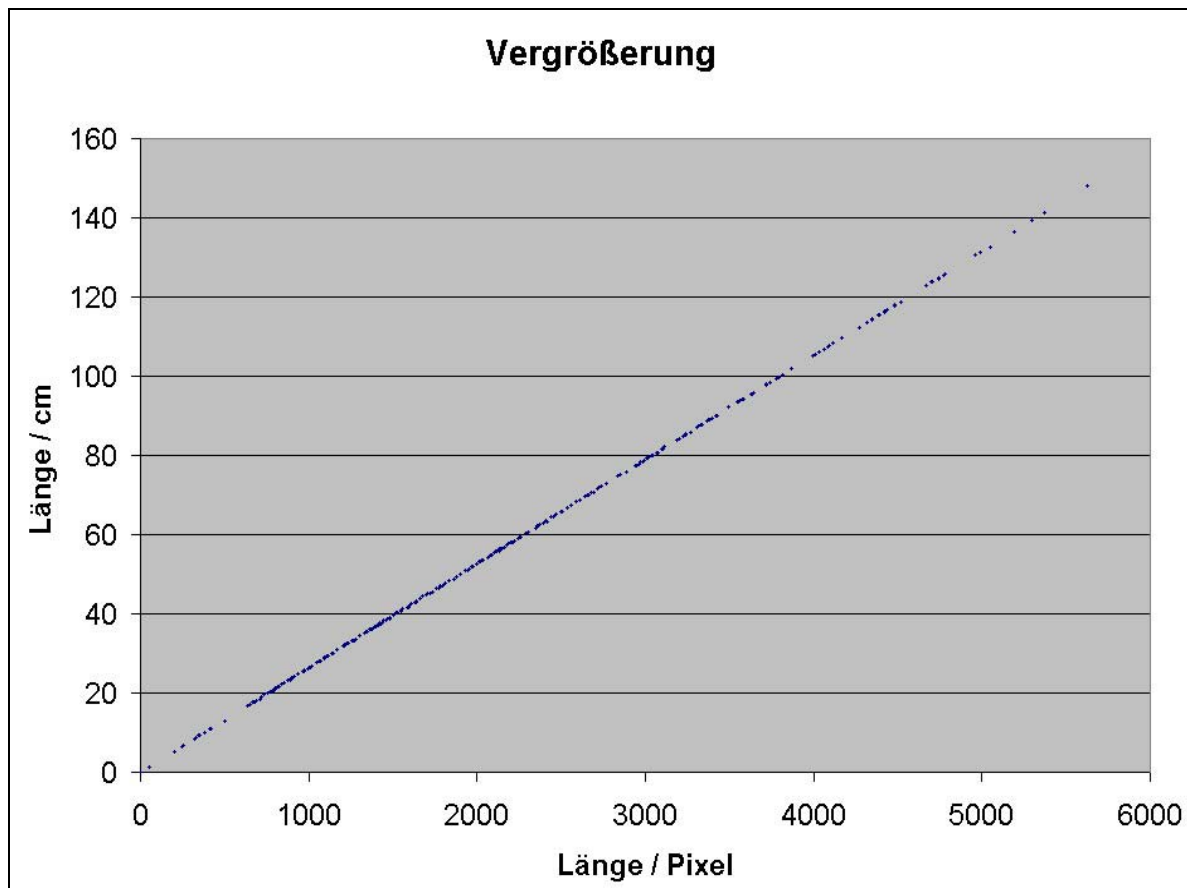


Abbildung 28: Vergrößerung

Meine Berechnungen ergeben für die Vergrößerung einen Wert von 0.0263 cm pro Pixel mit einem absoluten Umrechnungsfehler von 0.1182 cm. Dies entspricht einer maximalen Ungenauigkeit von 4 Pixel.

Um die Vergrößerung zu berechnen, wurden die Abstände für drei digitalisierte Aufnahmen bestimmt und deren Mittelwerte verwendet. Bei den Aufnahmen handelte es sich dabei jeweils um das Bild aus der zentralen Ansicht, View 2.

Sobald die Blaskammeraufnahmen für den Versuchsbetrieb in großer Zahl digitalisiert werden, sollte die Vergrößerung erneut bestimmt und die Konstante in der Software gegebenenfalls korrigiert werden.

3.1.2 Tiefenbestimmung

Da die Spuren nicht parallel zur Kameraebene und insbesondere nicht alle in derselben Ebene verlaufen, wird für genauere Messungen eine räumliche Rekonstruktion der Spuren erforderlich. Das Bestimmen der in die Kameraebene projizierten x - und y -Koordinaten aus der zentralen Ansicht (View 2) stellt kein Problem dar. Es muss nun lediglich noch die z -Koordinate bestimmt werden. Da es aber nicht möglich ist diese Tiefe allein aus der zentralen Ansicht zu bestimmen, wird zusätzlich eine der anderen Ansichten (View 1 oder View 3) benötigt. Die Tiefe der Blaskammer beträgt 50,5 cm.

Stereo-Shift-Verfahren⁵⁹

Zur Bestimmung der z -Koordinate wird das sogenannte „Stereo-Shift-Verfahren“ verwendet. Hinter dieser Bezeichnung verbirgt sich der mathematische Strahlensatz. Das Vorgehen:

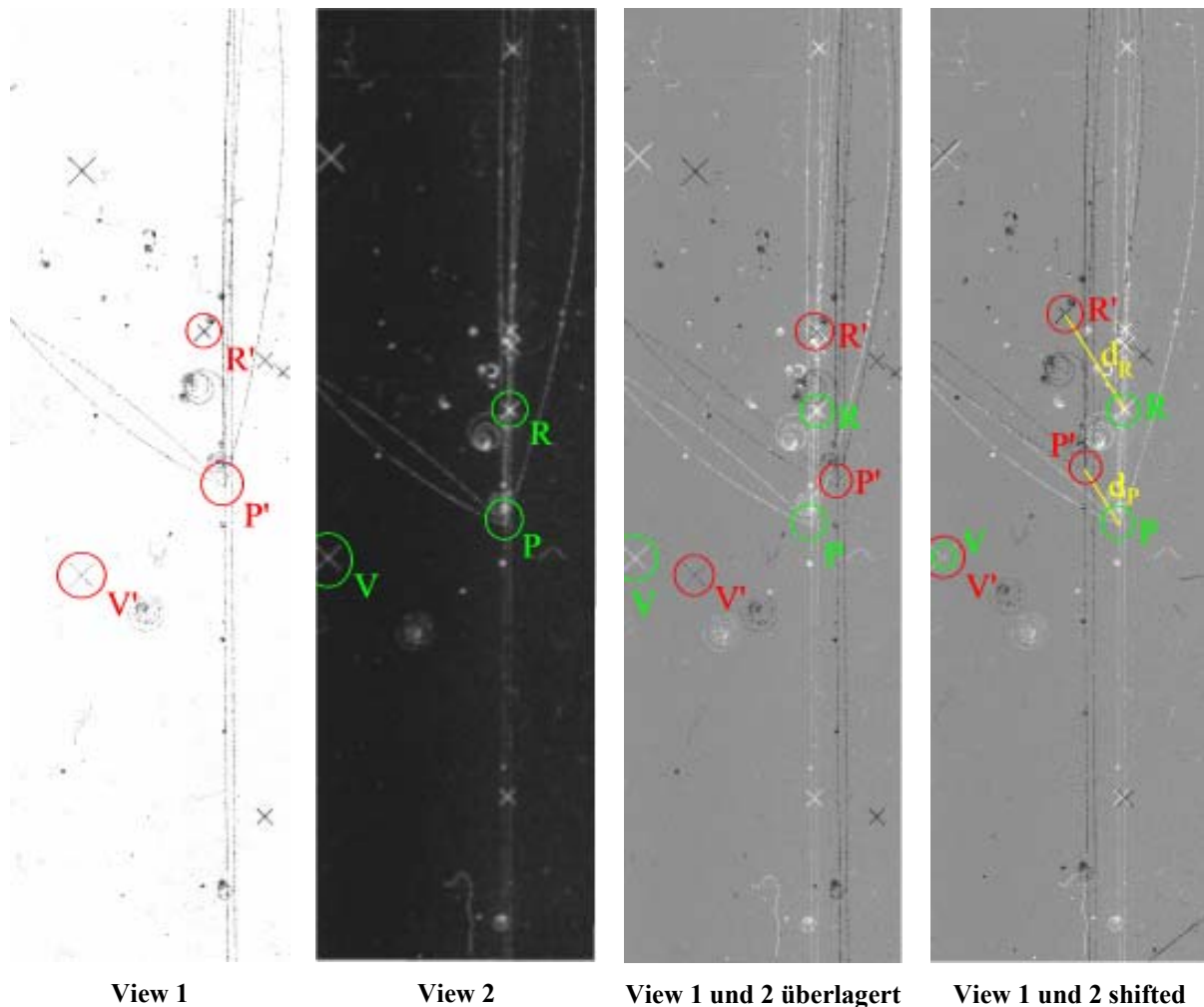


Abbildung 29: Stereo-Shift-Verfahren (Aufnahme 2403_710, View 1 und 2)

- Es werden zwei Aufnahmen desselben Augenblicks aus zwei verschiedenen Ansichten benötigt.
- Man sucht sich auf den Blasenkammeraufnahmen zwei Bezugsmarken, die sich in der zentralen Ansicht in der Nähe des Punktes (P , P') befinden, dessen Tiefe man bestimmen möchte. Eine der Markierungen (V , V') muss von der Vorderseite (Innenseite der Scheibe), die andere von der Rückseite (R , R') der Kammer stammen.
- Die beiden Aufnahmen werden übereinander gelegt und so gegeneinander verschoben, dass die Markierungen V und V' in den beiden Aufnahmen zur Überdeckung kommen. In der Regel überdecken sich dabei die Markierungen R und R' bzw. die Punkte P und P' nicht .
- Der Abstand d_R zwischen den beiden Markierungen R und R' wird gemessen.
- Der Abstand d_P zwischen den beiden Punkten P und P' wird gemessen.
- Die Tiefe des Punktes P wird mit der folgenden Gleichung bestimmt.

⁵⁹ Siehe [1], Seiten 90 – 91.

$$z = 50,5 \frac{d_P}{d_R} \text{ cm}$$

Tiefe eines Spurpunktes

Das obige Verfahren kann nur dann angewendet werden, wenn der Punkt, dessen Tiefe man bestimmen will, so markant ist, dass man ihn in beiden Ansichten eindeutig identifizieren kann. Mit den Bezugsmarken sollte es daher keine Probleme geben. Anders ist es bei Punkten die auf einer Spur liegen. Hier gestaltet sich der Fall um ein Vielfaches komplizierter. Für die Bestimmung des Impulses aus der Krümmung ist es aber notwendig die z -Komponente von Spurpunkten zu kennen. Dabei sollte man sich selbstverständlich nicht nur auf auffällige Punkte beschränken müssen, sondern beliebige Punkte verwenden dürfen.

Der Anfangspunkt a und der Endpunkt e einer Spur sind in den meisten Fällen ausreichend markant, so dass sich ihre z -Komponenten gut bestimmen lässt. Die z -Komponenten aller Spurpunkte dazwischen lassen sich aus den Tiefen dieser beiden Punkte, der Länge l der Spur zwischen a und e und der Spurlänge l_s zwischen Anfangspunkt und Spurpunkt s berechnen:

$$s_z = a_z + \frac{l_s}{l} (e_z - a_z)$$

mit

$$a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}, e = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} \text{ und } s = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix}.$$

Zur Bestimmung der Tiefe beliebiger Punkte auf einer Spur genügt es also, die Tiefe des Anfangs- und des Endpunktes zu bestimmen.

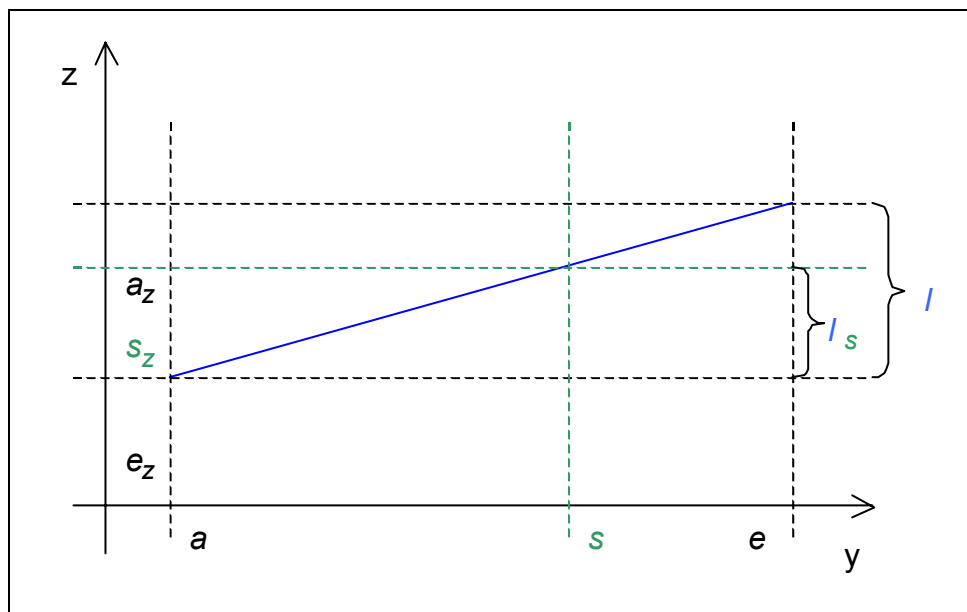


Abbildung 30: Tiefe eines Spurpunktes

Anmerkung: Exakte Werte liefert diese Methode nur bei konstanter Geschwindigkeit in z -Richtung. Für Ergebnisse größerer Genauigkeit müsste man also tatsächlich die Tiefe jedes Spurpunktes mit Hilfe des Stereo-Shift-Verfahrens bestimmen. Die Software sieht ein solches Vorgehen zur Zeit nicht vor.

3.1.3 Krümmungsmessung

Mit Hilfe der Krümmung von Spuren auf den Blasenkammeraufnahmen ist es möglich die Impulse der beteiligten Teilchen zu bestimmen. Durch die Anpassung eines Kreises an die betroffene Spur und die Ermittlung seines Radius r kann man schließlich die Krümmung κ der Spur bestimmen. κ beträgt dementsprechend

$$\kappa = \frac{1}{r}.$$

Da es sich bei den Spuren um Spiralen handelt, kann die Krümmung mit diesem Verfahren nur näherungsweise berechnet werden.

Auch wenn hier von der Krümmung der Spuren gesprochen wird, verwendet man für die eigentlichen Berechnungen des Impulses nicht die Krümmung, sondern den Krümmungsradius. Eine Methode zur Bestimmung des Radius ist die Sagitta-Methode.

Sagitta-Methode⁶⁰

Die Sagitta-Methode erlaubt es mit geringem Aufwand, den Radius eines Kreisbogens aus zwei zu vermessenden Abständen zu ermitteln. Hierzu wählt man zunächst zwei Punkte auf dem Kreisbogen und misst dann die Länge l der Sekante durch diese beiden Punkte. Danach fällt man das Lot vom Mittelpunkt m der Sekante auf den Kreisbogen und bestimmt die Länge d dieser Strecke. Aus diesen beiden Werten berechnet sich der Radius r wie folgt:

$$r = \frac{l^2}{8d} + \frac{d}{2}.$$

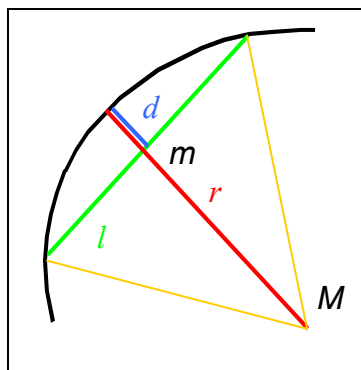


Abbildung 31: Sagitta-Methode

⁶⁰ Siehe [1], Seite 89.

3-Punkte-Methode⁶¹

Die Sagitta-Methode ist zwar hervorragend zur manuellen Bestimmung des Radius eines Kreisbogens unter Zuhilfenahme eines Lineals geeignet, wird aber bei Verwendung eines Computers durch diesen weitestgehend ersetzt. Für die softwaregestützte Methode berechnet man zunächst den Mittelpunkt des Kreisbogens aus drei beliebig gewählten Punkten auf dem Kreis. Den Radius erhält man dann aus dem Abstand zwischen dem Mittelpunkt und einem der drei Kreispunkte. Dieses Verfahren erleichtert die Berechnungen durch die Tatsache, dass man drei beliebige Punkte a , b und c verwenden kann, während bei der Sagitta-Methode ein Punkt, nämlich der Schnittpunkt von Lot und Kreisbogen, sorgfältig bestimmt werden muss.

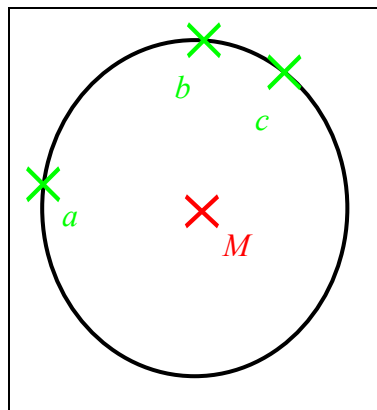


Abbildung 32: 3-Punkte-Methode

Der Mittelpunkt M lässt sich durch folgende Gleichungen berechnen:

$$A = \begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} \\ A_{10} & A_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_x - a_x & b_y - a_y \\ c_x - a_x & c_y - a_y \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} b_x^2 + b_y^2 - a_x^2 - a_y^2 \\ c_x^2 + c_y^2 - a_x^2 - a_y^2 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{H_x A_{11} - H_y A_{01}}{A_{00} A_{11} - A_{10} A_{01}} \\ \frac{H_x A_{10} - H_y A_{00}}{A_{01} A_{10} - A_{11} A_{00}} \end{pmatrix}$$

mit Kreispunkten

$$a = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad c = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix}.$$

Unter Verwendung von Kreispunkt a gilt dann für den Radius r

$$r = \sqrt{(M_x - a_x)^2 + (M_y - a_y)^2}.$$

⁶¹ Siehe [15].

$$R(a, b, c) := r.$$

3-Punkte-Methode - Dreidimensional⁶²

Mit den beiden oben vorgestellten Möglichkeiten lassen sich scheinbar problemlos die Radien der Teilchenspuren bestimmen. – Allerdings hat man dabei nicht beachtet, dass beide Methoden nur in einer Ebene funktionieren, während die Spuren im Innern der Blaskammer dreidimensional verlaufen. Man hat also nur den Radius der in die Kameraebene projizierten Spur vermessen. Der hierbei entstehende Fehler sollte möglichst korrigiert werden.

Für die Sagitta-Methode müsste man hierzu die Länge l der Sekante aus den dreidimensionalen Koordinaten ihrer Start- und Endpunkte berechnen. Der Wert für die Strecke d ändert sich aber nicht.

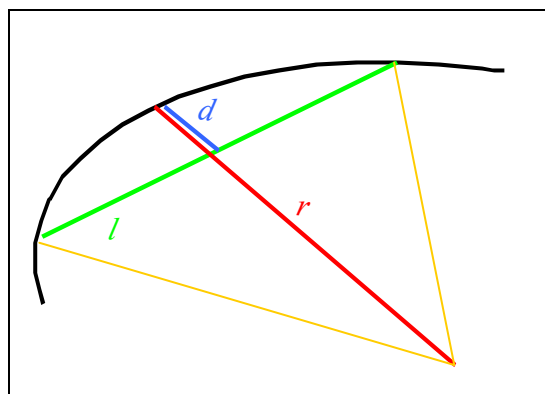


Abbildung 33: Sagitta-Methode, dreidimensional

Mit der 3-Punkte-Methode ist die Bearbeitung wesentlich aufwändiger, da die z -Koordinaten der drei Punkte a , b und c berücksichtigt werden müssen. Die drei Punkte definieren nicht nur eindeutig den Kreis auf dem sie liegen und seinen Mittelpunkt, sondern auch eine Ebene. Man braucht also nur die Koordinaten der drei Punkte bezüglich der durch sie definierten Ebene E zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Koordinaten berechnet man dann den Mittelpunkt bezüglich E wie oben beschrieben. Schließlich rechnet man die zweidimensionalen Koordinaten des Mittelpunktes wieder in dreidimensionale Koordinaten um. Die verwendeten Formeln werden im Folgenden angegeben. Dabei werden die dreidimensionalen Ortsvektoren der drei Kreispunkte betrachtet:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}, \vec{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} \text{ und } \vec{c} = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{pmatrix}.$$

Um die Aufgabe einfacher zu gestalten, verschiebt man die drei Vektoren so, dass einer der Vektoren schließlich im Ursprung des Koordinatensystems liegt. Daher verläuft dann auch die Ebene E durch den Ursprung. Zum Beispiel verschiebt man den Vektor $\vec{a}$ in den Punkt $\vec{a}' \equiv \vec{0}$.

⁶² Siehe [10] Kapitel III und IV, [9].

$$\vec{a}' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b}' = \begin{pmatrix} b_x - a_x \\ b_y - a_y \\ b_z - a_z \end{pmatrix} \text{ und } \vec{c}' = \begin{pmatrix} c_x - a_x \\ c_y - a_y \\ c_z - a_z \end{pmatrix}$$

Den Ursprung des dreidimensionalen Koordinatensystems in dem $\vec{a}'$ nun liegt, verwendet man auch als Ursprung $\vec{a}''$ der Ebene. Daher müssen jetzt nur noch die Koordinaten der Vektoren $\vec{b}''$ und $\vec{c}''$ der beiden verbliebenen Vektoren $\vec{b}'$ und $\vec{c}'$, bezüglich eines geeigneten rechtwinkligen Koordinatensystems, in der Ebene bestimmt werden.

Um die Koordinaten von $\vec{b}''$ und $\vec{c}''$ bestimmen zu können, wird zuerst der Einheitsvektor $\vec{b}'_{norm}$ zu $\vec{b}'$ und danach ein zu $\vec{b}'_{norm}$ senkrechter Einheitsvektor $\vec{b}'_{perp}$ erzeugt.

$$\vec{b}'_{norm} = \frac{\vec{b}'}{|\vec{b}'|} \text{ und } \vec{b}'_{perp} = \frac{\vec{b}' \times \vec{c}' \times \vec{b}'}{|\vec{b}' \times \vec{c}' \times \vec{b}'|}$$

Diese beiden zueinander senkrechten Einheitsvektoren werden nun zur Orthonormal-Basis der Ebene. In deren Bezugssystem werden die Koordinaten $\vec{a}''$, $\vec{b}''$ und $\vec{c}''$ angegeben:

$$\vec{a}'' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{b}'' = \begin{pmatrix} |\vec{b}'| \\ 0 \end{pmatrix} \text{ und } \vec{c}'' = \begin{pmatrix} \vec{b}'_{norm} \bullet \vec{c}' \\ \vec{b}'_{perp} \bullet \vec{c}' \end{pmatrix}.$$

Die Vektoren $\vec{a}''$, $\vec{b}''$ und $\vec{c}''$ werden nun als Punkte a , b und c in der oben beschriebenen 3-Punkte-Methode verwendet. Der dreidimensionale Mittelpunkt $\vec{M}$ und der Radius R ergeben sich aus dem zweidimensionalen Mittelpunkt M wie folgt:

$$\vec{M} = \vec{a} + \vec{b}_{norm} M_x + \vec{b}_{perp} M_y,$$

$$R = |\vec{M} - \vec{a}|.$$

$$R(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}) := R.$$

Da diese Methode, meiner Meinung nach, dem Benutzer die höchste Flexibilität während der Bearbeitung der Aufgaben ermöglicht, kommt sie in der Software zum Einsatz.

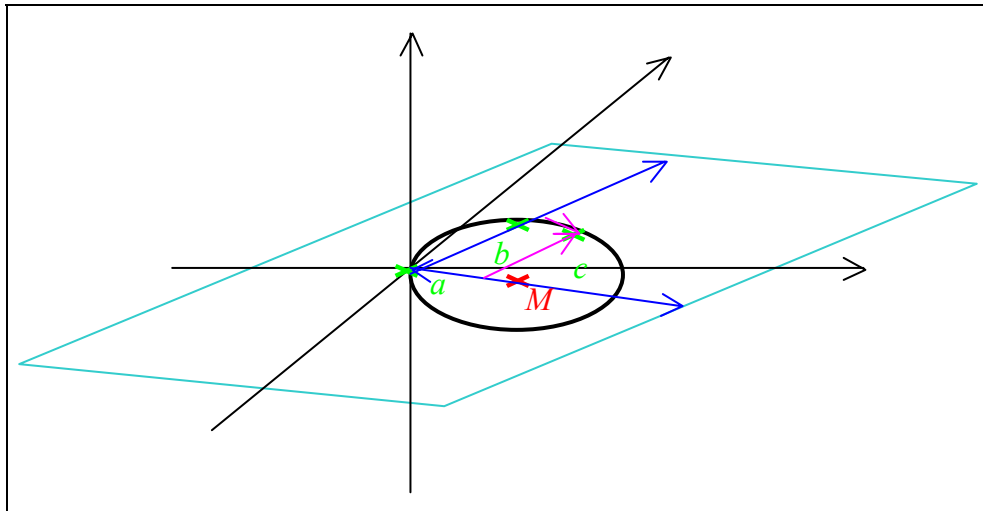


Abbildung 34: 3-Punkte-Methode, dreidimensional

Anmerkungen

Als weiteres Verfahren zur Bestimmung des Krümmungsradius ist noch die Verwendung von Radiuschablonen – Platten, auf denen Kreisbögen unter Angabe ihres Radius aufgetragen sind – zu nennen. Diese Methode ist allerdings für die Arbeit am Computer ungeeignet und wird hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Für alle Methoden gilt es zu beachten, dass die Genauigkeit der Berechnungen mit zunehmendem Radius nachlässt.

3.2 Spurlänge

Zur Bestimmung der Spurlänge l_s eignen sich mehrere aufeinander aufbauende Methoden. Diese liefern unterschiedlich genaue Ergebnisse.

Sekanten

Die einfachste und zugleich auch ungenaueste Methode besteht darin, den geraden Abstand zwischen Anfang- und Endpunkt der Spur zu messen. Die Genauigkeit des Ergebnisses kann gesteigert werden, indem man mehrere Punkte p_i auf der Spur wählt und die Längen l_i der Strecken s_i , zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Punkten, aufaddiert. Hierbei nimmt die Exaktheit mit der Zahl der gewählten Punkte zu. Der Wert, den man erhält, wird in der Regel immer etwas kleiner sein als die tatsächliche Länge.

$$l_s \geq \sum_i l_i$$

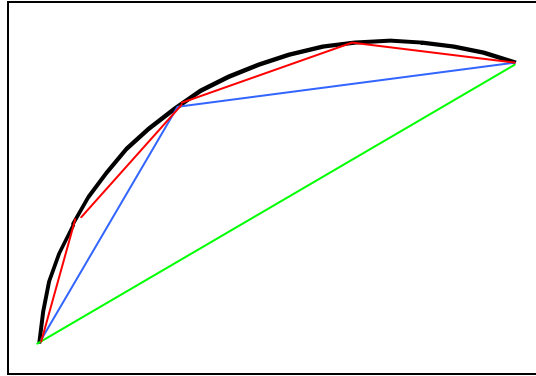


Abbildung 35: Spurlänge - Sekanten

Bogenlänge

Aus denselben Punkten lässt sich unter erhöhtem Rechenaufwand auch noch zu genaueren Ergebnissen gelangen. Voraussetzung hierfür ist die vereinfachende Annahme, dass die Spur in kleinen Abschnitten annähernd kreisförmig verläuft.

Man kann, wie im Abschnitt „3-Punkte-Methode“⁶³ beschrieben, aus jeweils drei Punkten auf der Spur den Radius des Kreises durch diese drei Punkte bestimmen. Über den Radius lässt sich dann die Länge des Bogens durch die drei Punkte bestimmen. Bei Verwendung von n Punkten p_i ergeben sich $n - 1$ Bögen mit Radien

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R(p_1, p_2, p_3) \\
 &\vdots \\
 R_i &= \frac{R(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) + R(p_i, p_{i+1}, p_{i+2})}{2} \\
 &\vdots \\
 R_{n-1} &= R(p_{n-2}, p_{n-1}, p_n)
 \end{aligned}$$

und Bogenlängen

$$B_i = \angle(p_i, p_{i+1}) R_i.$$

Wie zuvor schon die Sekantenlängen werden die Bogenlängen zur Spurlänge aufaddiert

$$l_S = \sum_{i=1}^{n-1} B_i.$$

⁶³ Siehe Seite 53.

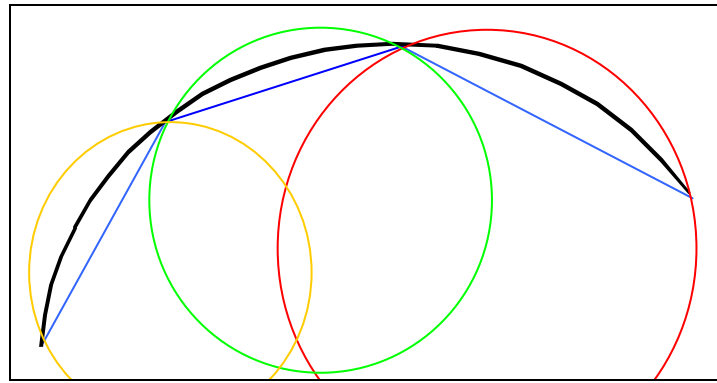


Abbildung 36: Spurlänge - Bogenlänge

Anmerkung: Zur Berechnung des Winkels α zwischen p_i und p_{i+1} wird der Mittelpunkt M_i des Kreises durch p_i , p_{i+1} und p_{i-1} bzw. p_{i+2} zur Hilfe genommen

$$\begin{aligned}\vec{p}_i &= p_i - M_i \\ \vec{p}_{i+1} &= p_{i+1} - M_i \\ \alpha &= \arccos\left(\frac{|\vec{p}_i| |\vec{p}_{i+1}|}{\vec{p}_i \cdot \vec{p}_{i+1}}\right).\end{aligned}$$

Anmerkung: In der Software werden anstatt der Radien die Werte der Bogenlänge gemittelt. Da die Bogenlänge linear vom Radius abhängt, verändert dies das Ergebnis nicht.

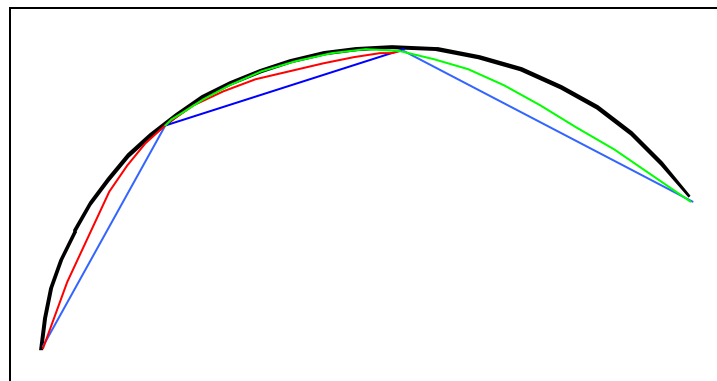


Abbildung 37: Spurlänge - gemittelte Bogenlänge

Spurlänge - Dreidimensional

Jede der beschriebenen Methoden kann nicht nur bei ebenen, sondern auch bei räumlichen Koordinaten zum Einsatz kommen. Die Software berechnet unter Verwendung der Bogenlänge-Methode die Spurlänge aus den räumlichen Koordinaten der Punkte. Die z -Koordinaten der Punkte werden wie in Abschnitt „Tiefe eines Spurpunktes“⁶⁴ und die Radien R_i wie in Abschnitt „3-Punkte-Methode - Dreidimensional“⁶⁵ beschrieben berechnet.

⁶⁴ Siehe Seite 51.

⁶⁵ Siehe Seite 54.

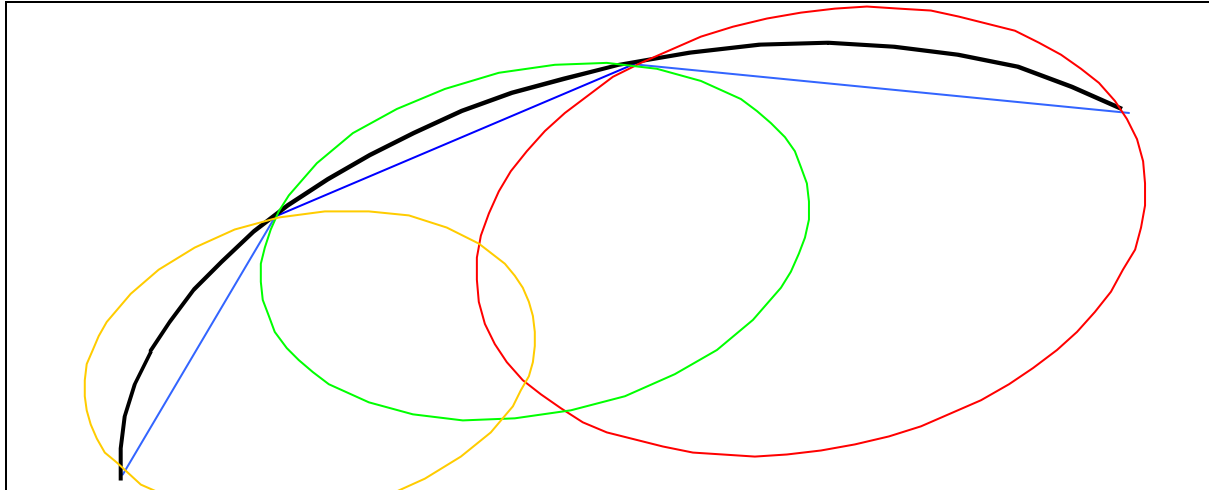


Abbildung 38: Spurlänge - Bogenlänge, dreidimensional

3.3 Wirkungsquerschnitt

Im Rahmen der ersten Versuchsaufgabe soll der Wirkungsquerschnitt für Proton-Proton-Wechselwirkungen bestimmt werden. Der Wirkungsquerschnitt σ ist ein Maß für die Häufigkeit mit der eine bestimmte Reaktion auftritt. Berechnet wird er als Quotient aus der Anzahl der pro Zeiteinheit und Kern stattgefundenen Reaktionen und der Anzahl der pro Zeiteinheit und Fläche eingefallenen Teilchen:

$$\sigma = \frac{R}{I}$$

mit

$R \equiv$ Anzahl der pro Zeiteinheit und Kern stattfindenden Reaktionen

$I \equiv$ Intensität der einlaufenden Teilchen

Der Wirkungsquerschnitt hat die Dimension einer Fläche und liegt in der Größenordnung des Quadrats eines Kernradius. Aufgrund der sehr kleinen Fläche wird die Einheit Barn verwendet:

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2.$$

Im Versuch wird zwischen dem totalen Wirkungsquerschnitt σ_{tot} und dem elastischen Wirkungsquerschnitt σ_{el} unterschieden. Aus der Beziehung:

$$n(x) = n_0 - n_{WW} = n_0 \exp\left(-\frac{\sigma_{tot} N_A \rho_{H_2} x}{\mu_{H_2}}\right).$$

ergeben sich die Werte für σ_{tot} und σ_{el} zu:

$$\sigma_{tot} = \frac{\mu_{H_2}}{N_A \rho_{H_2} x} \ln \left(\frac{n_0}{n_0 - n_{WW}} \right)$$

$$\sigma_{el} = \sigma_{tot} \frac{n_{el}}{n_{WW}}$$

mit

$N_A \equiv$ Avogadro - Konstante

$\mu_{H_2} \equiv$ molare Masse des flüssigen Wasserstoffs

$\rho_{H_2} \equiv$ Dichte des flüssigen Wasserstoffs

$x \equiv$ Länge des Messvolumens (Effective Range)

$n_0 \equiv$ Anzahl der einfallenden Teilchen

$n_{WW} \equiv$ Anzahl der Wechselwirkungen

$n_{el} \equiv$ Anzahl der elastischen Wechselwirkungen

3.4 Multiplizität

Insgesamt werden drei verschiedene Werte für die Multiplizität bestimmt.

3.4.1 Mittlere geladene Multiplizität

Unmittelbar aus den Messwerten ergibt sich die mittlere geladene Multiplizität. Sie ist der Mittelwert der für die einzelnen Wechselwirkungen bestimmten Multiplizitäten⁶⁶, also der jeweiligen Anzahl von sichtbaren Spuren, die vom Wechselwirkungspunkt ausgehen. Die sichtbaren Spuren lassen auf die Beteiligung geladener Teilchen schließen und treten aufgrund der Ladungserhaltung immer nur paarweise (ein positiv und ein negativ geladenes Teilchen) auf. Die mittlere geladene Multiplizität ist definiert als

$$m_{gel} = \frac{\sum_{WW} n_{prong}}{n_{WW}}$$

mit

$n_{prong} \equiv$ Anzahl der auslaufenden Spuren je Wechselwirkung

$\equiv$ geladene Multiplizität der einzelnen Wechselwirkungen

$n_{WW} \equiv$ Anzahl der Wechselwirkungen

3.4.2 Mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen

Über die mittlere geladene Multiplizität

Da neutrale Teilchen in der Blaskammer keine Spuren erzeugen, kann deren Multiplizität nicht unmittelbar berechnet werden. Für die mittlere Multiplizität m_{π_0} der neutralen Pionen

⁶⁶ Siehe Abschnitt „ Interaction“ auf Seite 36.

lässt sich aber ein Wert anhand der mittleren geladenen Multiplizität abschätzen. Dazu müssen allerdings eine Reihe vereinfachender Annahmen gemacht werden, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll. Es ergibt sich folgende Gleichung für m_{π_0} :

$$m_{\pi_0} = \frac{m_{gel}}{4}$$

Über konvertierte Photonen

Eine weitere Methode die mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen zu bestimmen, ergibt sich aus der Anzahl konvertierter Photonen. Die neutralen Pionen zerfallen in etwa 99% aller Fälle in zwei γ -Quanten. Kommen diese wiederum in die Nähe eines Kerns, kann es zur Paarbildung kommen und ein Elektron-Positron-Paar entsteht, das sich auf den Blasenkammeraufnahmen beobachten lässt.

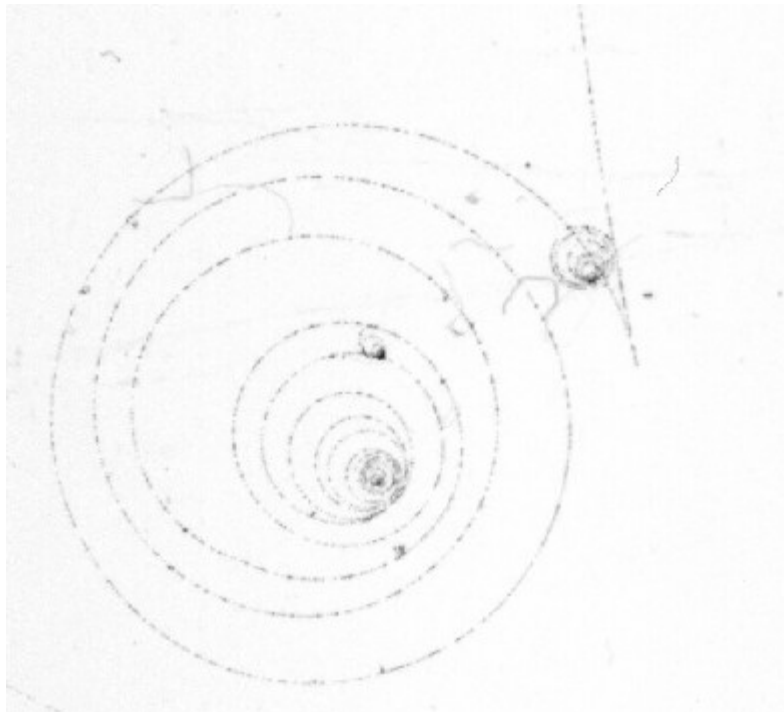


Abbildung 39: Elektron-Positron-Paar

Um nun auf die mittlere Multiplizität der π_0 -Mesonen schließen zu können, zählt man die konvertierten γ -Quanten im Messbereich, die mit einer Wechselwirkung, die ebenfalls im Messbereich liegt, assoziiert werden können. Da pro π_0 jeweils zwei Photonen entstehen, entspricht die Hälfte dieser Ereignisse der Anzahl neutraler Pionen.

Dabei vernachlässigt man allerdings, dass aufgrund der großen Konversionslänge für Photonen – in flüssigem Wasserstoff beträgt sie circa 1146 cm – die Wahrscheinlichkeit sinkt, die Konversion des Photons noch innerhalb des Messbereichs bzw. der Blasenkammer zu beobachten. Will man diese Tatsache berücksichtigen, ergibt sich ein recht komplizierter Ausdruck zur Berechnung der mittleren Multiplizität. Auf die Herleitung dieses Ausdrucks soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, es wird nur das Resultat angegeben:

$$m_{\pi_0} = \frac{\frac{n_k}{2n_{in}}}{1 - \frac{x_k}{x} + \frac{x_k}{x} \exp\left(-\frac{x}{x_k}\right)}$$

mit

$n_k \equiv$ Anzahl der konvertierten Photonen

$n_{in} \equiv$ Anzahl der inelastischen Wechselwirkungen

$x_k \equiv$ Konversionslänge der Photonen

$x \equiv$ Länge des Messbereichs

3.5 Impuls

Möchte man Blasenkammeraufnahmen auswerten, ist es nötig die Impulse der an den Ereignissen beteiligten Teilchen zu bestimmen. Aufgrund des Magnetfeldes im Inneren der Kammer werden die geladenen Teilchen auf eine Kreisbahn bzw. auf eine Spirale gezwungen. Über die Krümmung der Spur lässt sich der Impuls berechnen. Allerdings gibt es hier ein Problem. Denn je kürzer die Spuren sind, desto schwieriger wird es, unabhängig von der verwendeten Methode, ihre Krümmung genau zu bestimmen. In solchen Fällen erhält man exaktere Ergebnisse wenn man den Impuls aus der Reichweite bestimmt. Beide Methoden werden im Folgenden beschrieben.

3.5.1 Impuls aus der Krümmung⁶⁷

Die Teilchen werden senkrecht zum Magnetfeld in die Blasenkammer eingeschossen, deshalb verlaufen die Spuren geladener Teilchen annähernd auf Kreisbahnen. Verursacht wird diese Ablenkung durch die Lorentz-Kraft:

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B}$$

mit

$e \equiv$ Elementarladung $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$\vec{v} \equiv$ Geschwindigkeit des Teilchens

$\vec{B} \equiv$ Magnetfeld $1,74 \text{ T}$

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Bahn des Teilchens und führen zu Abweichungen von der Kreisform:

- Energieverlust durch Ionisation.
- Vielfachstreuung.

Unter Annahme einer Kreisbahn kann man daher bei bekanntem Magnetfeld $\vec{B}$ und Kreisradius r den betragsmäßigen Impuls p des Teilchens berechnen. Dazu setzt man die Zentrifu-

⁶⁷ Siehe [1], Seiten 34 – 37.

galkraft und die Lorentzkraft gleich, wobei nur der Anteil der Geschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld, nämlich $v_{\perp}$, einen Beitrag leistet.

$$\frac{mv_{\perp}^2}{r} = ev_{\perp} B \Leftrightarrow$$

$$p = eBr$$

mit

$$m = m_0 \gamma \equiv \text{relativistische Masse des Teilchens}.$$

Bei Angabe des Magnetfeldes in Tesla und des Radius in Metern erhält man den Impuls in GeV/c über die vereinfachte Formel:

$$p = 0,3 Br$$

$$[\text{GeV}/c] = [\text{T}][\text{m}]$$

Möchte man den vektoriellen Impuls $\vec{p}$ bestimmen, so braucht man hierzu nur den Impuls-Betrag p mit dem Einheitsvektor in Richtung der Spur, an der Stelle an der man den Radius bestimmt hat, zu multiplizieren.

3.5.2 Impuls aus der Reichweite⁶⁸

Im Falle sehr kurzer Spuren, von nur wenigen Zentimeter Länge, ist es schwer den Impuls aus der Krümmung bzw. dem Krümmungsradius genau zu bestimmen. Hier gelangt man zu besseren Ergebnissen, wenn man den Impuls aus der Reichweite des Teilchens, also der Länge seiner Spur, berechnet.

Anmerkung: Für sehr schnelle Teilchen ist auch diese Methode ungeeignet, da in der Regel nicht die gesamte Spur auf der Blaskammeraufnahme zu sehen sein wird.

Da ein Teilchen auf seinem Weg durch Materie ständige Energieverluste dE durch Ionisation bzw. durch Stöße mit anderen Teilchen erleidet, nimmt seine Geschwindigkeit v stetig ab. Dadurch wird in letzter Konsequenz seine Reichweite R begrenzt. R hängt also vom Anfangswert der kinetischen Energie, des Impulses bzw. der Geschwindigkeit ab.

Die Bethe-Bloch-Gleichung

Der Zusammenhang zwischen Impuls und Energieverlust wird durch die Bethe-Bloch-Gleichung beschrieben. Sie wird im Folgenden ohne den Term zur Dichtekorrektur, der erst bei höheren Impulsen ($\beta\gamma > 1$, $p > 100 \text{ MeV}/c$) relevant wird, angegeben:

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

mit

⁶⁸ Siehe [5].

$$K \equiv 0.307075 \text{ MeVcm}^2$$

$A \equiv 1 \text{ g mol}^{-1}$, Atommasse des flüssigen Wasserstoffs

$Z \equiv$ Kernladungszahl der Kammerflüssigkeit

$I \equiv 21,8 \cdot 10^{-6} \text{ MeV}$, mittlere Anregungsenergie des flüssigen Wasserstoffs

$\rho \equiv 0.063 \text{ g cm}^{-3}$, Dichte des flüssigen Wasserstoffs

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2}$$

$$\beta = \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

$T_{\max} \equiv$ maximale kinetische Energie die pro
Stoß an ein freies Elektron abgegeben
werden kann

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$m_e \equiv$ Ruhemasse des Elektrons

$v \equiv$ Geschwindigkeit des
Teilchens

$M \equiv$ Ruhemasse des Teilchens

$c \equiv$ Lichtgeschwindigkeit

Wie man sehen kann, ist diese Formel nicht geeignet um den Impuls unmittelbar aus der Reichweite zu berechnen. Statt dessen kann sie verwendet werden, um aus einem angenommenen Startwert p_0 für den Impuls den verringerten Impuls p_i nach einer gegebenen Strecke zu iterieren. Zudem kann man die Schrittweite dx , mit der die Strecke unterteilt wird, und damit auch die Genauigkeit vorgeben. Diese Iterationen machen selbstverständlich nur Sinn, solange sich für den Impuls bzw. für die kinetische Energie keine negativen Werte ergeben.

$$E_{kin,i} = E_{kin,i-1} + dE(p_{i-1})$$

$$p_i = p(E_{kin,i})$$

Die Software geht für die Berechnung des Impulses aus der Reichweite von einem maximalen Startimpuls p_0 aus. Der Wert für p_0 ist, abhängig vom betroffenen Teilchentyp (p , μ , π , K), so gewählt, dass er einer Reichweite entspricht, die größer ist als die Länge der Blaskammer. Ausgehend von diesem Anfangsimpuls wird der Energieverlust dE für die kleinsten, mit der Software noch messbaren Abstände dx , nämlich ein Pixel bzw. die entsprechende Länge in cm, berechnet. Über den Energieverlust wird nach jedem dieser Schritte der neue Wert für den Impuls p_i und die kinetische Energie $E_{kin,i}$ ermittelt, bis der Wert für die kinetische Energie die Bedingung $E_{kin,i} \geq 0$ nicht mehr erfüllt. Es werden also die Impulse zu allen Reichweiten zwischen 0 und R_0 in Schritten der Länge dx berechnet. Diese Berechnungen finden einmalig beim Start des Programms statt, und die derart ermittelten Werte werden für die spätere Verwendung in einer Tabelle gespeichert.

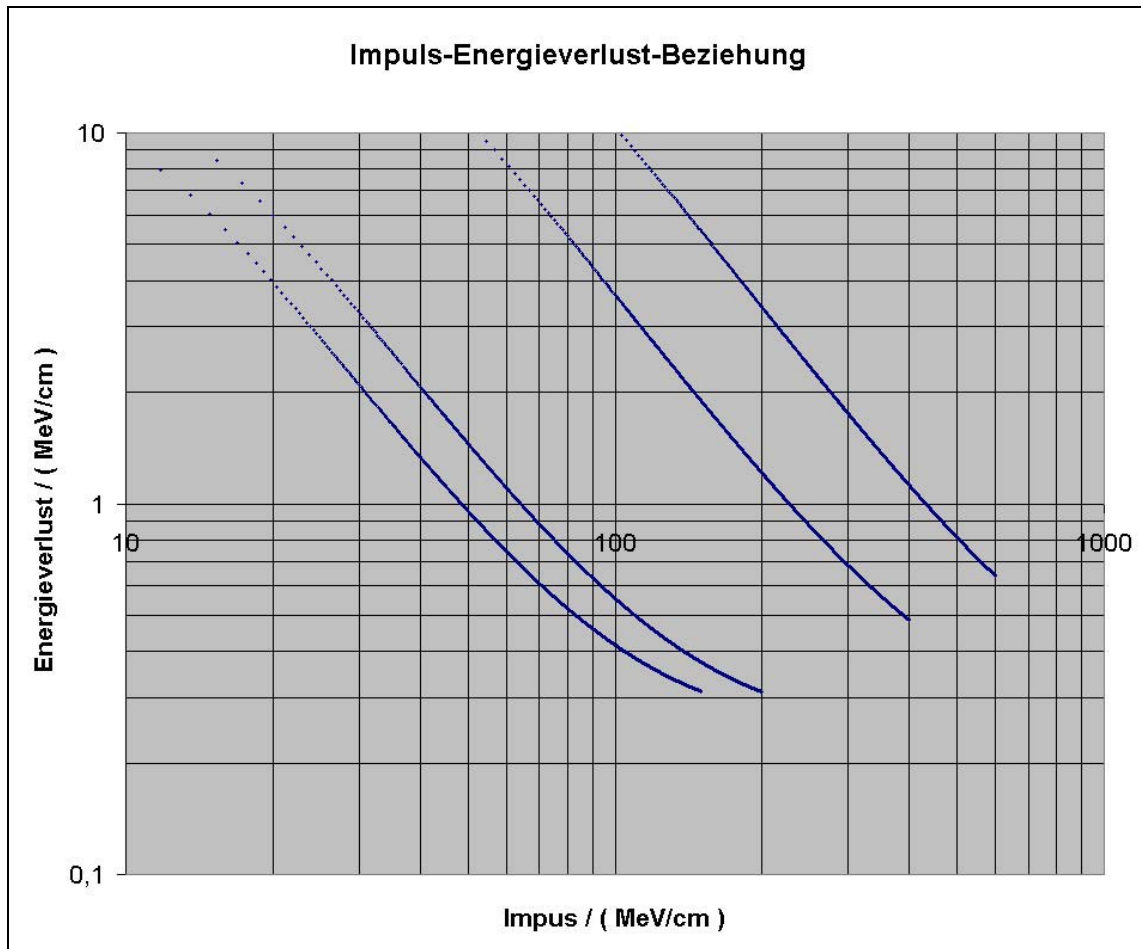


Abbildung 40: Beziehung zwischen Impuls und Energieverlust

Die Reichweite R_0 für den Anfangsimpuls p_0 beträgt

$$R_0 = R(p_0) = i_{\max} dx,$$

für die Reichweite R_i zu einem Impuls p_i gilt:

$$R_i = R(p_i) = (i_{\max} - i) dx$$

mit

$i_{\max} \equiv$ Nummer des letzten ($E_{kin} \geq 0$) Iterationsschrittes

$dx \equiv 0.0263$ cm, Schrittweite

$R_i \equiv$ verbliebene Reichweite nach Schritt i

$p_i \equiv$ Impuls nach Schritt i

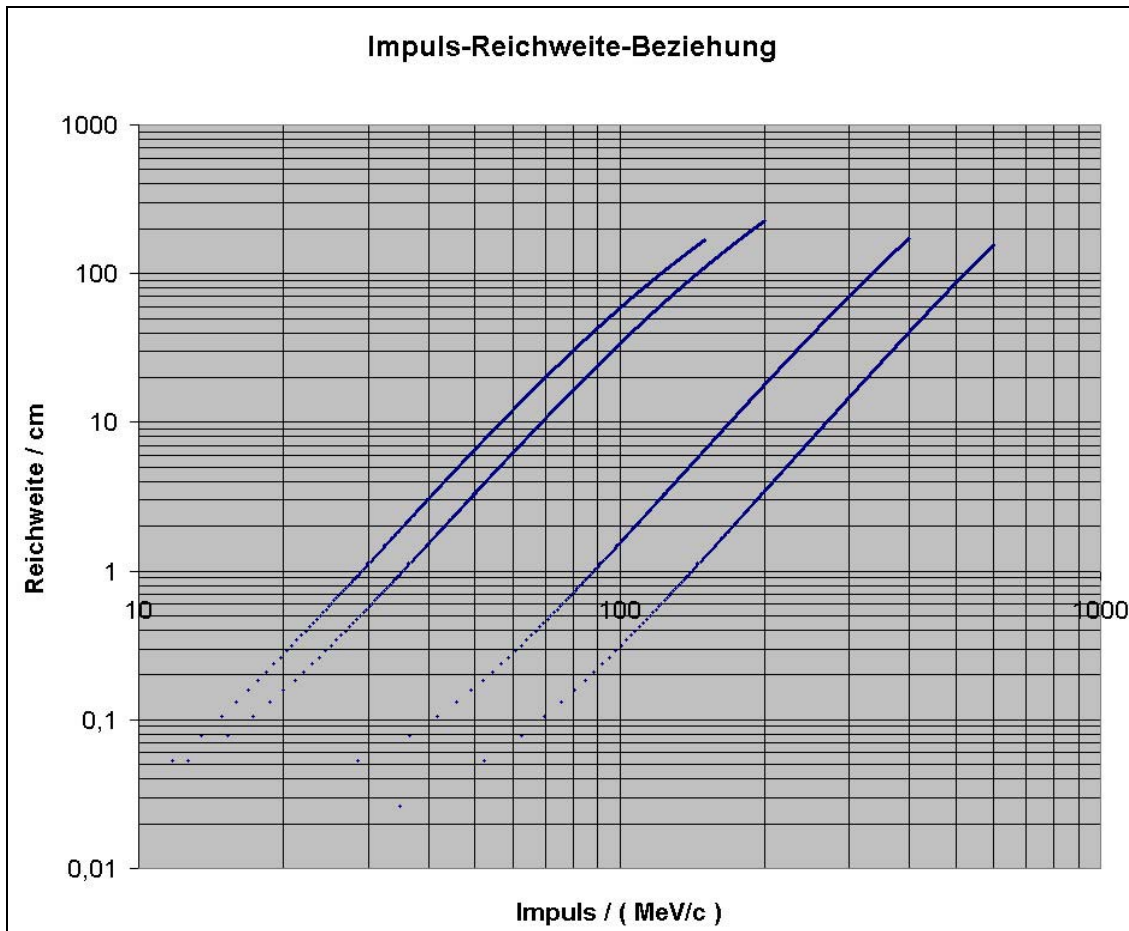


Abbildung 41: Beziehung zwischen Impuls und Reichweite

Umgekehrt findet man einen Näherungswert p_i für den Impuls p zur Reichweite R in den Werten zu Iterationsschritt

$$i = \frac{R}{dx}$$

und es gilt

$$p(R) = p_{i=\frac{R}{dx}}$$

Dieser Wert für p wird von der Software als Impuls zur Reichweite angegeben. Als Wert für die Reichweite dient hierbei die dreidimensional korrigierte Spurlänge.

Möchte man den vektoriellen Impuls $\vec{p}$ bestimmen, so braucht man hierzu nur den Impuls-Betrag p mit dem Einheitsvektor in Richtung der Spur, an der Stelle ab der man die Reichweite gemessen hat, zu multiplizieren.

Relativistische Kinematik

Die Reaktionen in der Blasenkammer finden bei so hohen kinetischen Energien statt, dass die auftretenden Geschwindigkeiten es notwendig machen die Kinematik relativistisch zu behan-

deln. Zentrales Element der relativistischen Formeln für Energie und Impuls ist der Faktor γ , der sich aus der Lorentz-Transformation ergibt

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

mit

$v \equiv$ Geschwindigkeit des Teilchens

$c \equiv$ Lichtgeschwindigkeit

Mit diesem Faktor gelangt man zu den relativistischen Gleichungen für die kinetische Energie E_{kin} und den Impuls p

$$E_{kin} = (\gamma - 1)m_0c^2$$

$$p = \gamma m_0 v.$$

Wobei m_0 die invariante Masse des Teilchens angibt.

Wie üblich vereinfacht man sich das relativistische Rechnen indem man die Lichtgeschwindigkeit auf Eins setzt.

$$c := 1$$

Nach einigen einfachen Umformungen gelangt man zu den Gleichungen, die ich in der Software genutzt habe, um mit Hilfe der Bethe-Bloch Gleichung die Impulse von Teilchen aus deren Reichweite zu gewinnen.

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2} \Leftrightarrow \beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$E_{kin} = m_0(\gamma - 1) \Leftrightarrow \gamma = \frac{E_{kin}}{m_0} + 1$$

$$p^2 = \gamma^2 m_0^2 \beta^2 = \gamma^2 \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) m_0^2 = (\gamma^2 - 1) m_0^2$$

$$\Rightarrow \gamma = \sqrt{\left(\frac{p}{m_0}\right)^2 + 1}$$

$$\Rightarrow p = m_0 \sqrt{\gamma^2 - 1} = m_0 \sqrt{\left(\frac{E_{kin}}{m_0} + 1\right)^2 - 1}$$

3.6 Ladungsvorzeichen⁶⁹

Falls man die Richtung des angelegten Magnetfeldes kennt, kann man sich leicht überlegen, in welche Richtung die Teilchen, abhängig von Ihrer Ladung, abgelenkt werden müssen. Der Drehsinn ihrer spiralförmigen Spuren gibt dann Auskunft über das Ladungsvorzeichen. Aber auch bei unbekannter Richtung des Magnetfeldes, gibt es für die Bestimmung des Ladungsvorzeichens ein sehr einfaches Verfahren.

Entlang der Bahn des einfallenden Teilchens werden beim Ionisationsprozess Elektronen aus den Hüllen der Flüssigkeitsatome geschlagen, die sogenannten δ -Elektronen. Manchmal ist es dabei der Fall, dass diese Elektronen ausreichend Energie erhalten um selbst spiralförmige Spuren zu hinterlassen. Der Drehsinn der Spirale gibt die Ablenkrichtung sämtlicher negativ geladener Teilchen im Magnetfeld an. Man braucht also nur ein einziges δ -Elektron zu finden bzw. eine Spur als solches zu identifizieren, um das Ladungsvorzeichen aller anderen Teilchen angeben zu können.

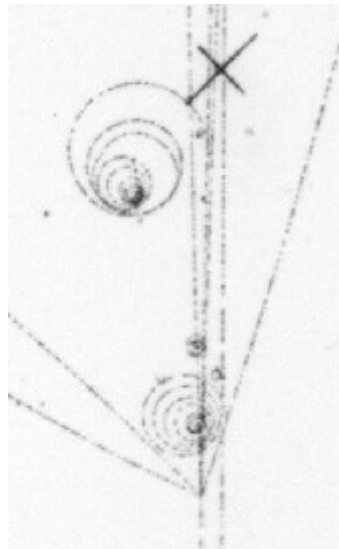


Abbildung 42: δ -Elektron

⁶⁹ Siehe [1], Seite 33.

A Anhang

A.1 Glossar

Im Folgenden werden einige Begriffe aus der Blasenkammerphysik erläutert, die ich oben verwende.

Wechselwirkung, elastisch / inelastisch

Bei den Wechselwirkungen unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Typen, den elastischen und den inelastischen. Die elastischen zeichnen sich dadurch aus, dass es sich bei den beteiligten Teilchen vor und nach der Wechselwirkung um dieselben Teilchen handelt. Während bei inelastischen Wechselwirkungen eine Umwandlung einzelner Teilchen in andere Teilchentypen stattfindet, kommt es bei elastischen Wechselwirkungen ausschließlich zu Änderungen des Impulses bzw. der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen.

Multiplizität, neutral / geladen⁷⁰

Als Multiplizität bezeichnet man die Anzahl der Spuren bzw. Teilchen, die von einem Wechselwirkungspunkt fortführen. Da ausschließlich geladene Teilchen in der Blasenkammer Spuren hinterlassen, kann die Anzahl der neutralen Teilchen, die von einem Wechselwirkungspunkt ausgehen nicht unmittelbar beobachtet werden. Man unterscheidet daher zwischen der geladenen Multiplizität, bei der es sich um die Anzahl der sichtbaren Spuren handelt, und der neutralen Multiplizität, die ein Maß für die Anzahl neutraler Teilchen darstellt. Im Gegensatz zur Anzahl der sichtbaren Spuren, die man durch Abzählen bestimmt, können für die neutrale Multiplizität nur Schätzwerte angegeben werden. In diese Schätzwerte gehen unter anderem die geladene Multiplizität, sowie die Wahrscheinlichkeiten für das Entstehen der möglichen neutralen Teilchen ein.

V^0 -Teilchen

Die Bezeichnung V^0 benennt nicht nur einen einzelnen Teilchentyp, sondern sie steht für eine ganze Klasse von Teilchen. Die Gemeinsamkeit dieser Teilchen besteht darin, dass es sich um neutrale Teilchen handelt, die jeweils in zwei geladene Teilchen zerfallen. Bei diesen Zerfallsprozessen erzeugen sie zwei sichtbare Spuren. Da diese Spuren von einem neutralen Teilchen ausgehen, welches selbst keine Spur hinterlässt, scheinen die beiden Spuren auf den Blasenkammeraufnahmen wie aus dem Nichts aufzutauchen. Der Form dieser Spuren auf den Blasenkammeraufnahmen, die dem Buchstaben „V“ ähneln, verdanken diese Teilchen ihren Namen. Die folgenden Zerfälle⁷¹ neutraler Teilchen in zwei geladene Teilchen sind möglich⁷²:

$$\begin{aligned} K_S^0 &\rightarrow \pi^+ \pi^- \\ &\rightarrow \mu^+ \mu^- \end{aligned}$$

⁷⁰ Siehe Abschnitt „Multiplizität“ auf Seite 60.

⁷¹ Siehe [1], Seite 75.

⁷² Es handelt sich hierbei nur um die wahrscheinlichsten Varianten. Für ausführliche Angaben siehe [4].

$$K_L^0 \rightarrow e^+ \mu^-$$

$$\rightarrow e^- \mu^+$$

$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$$

$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda \pi^0$$

$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$

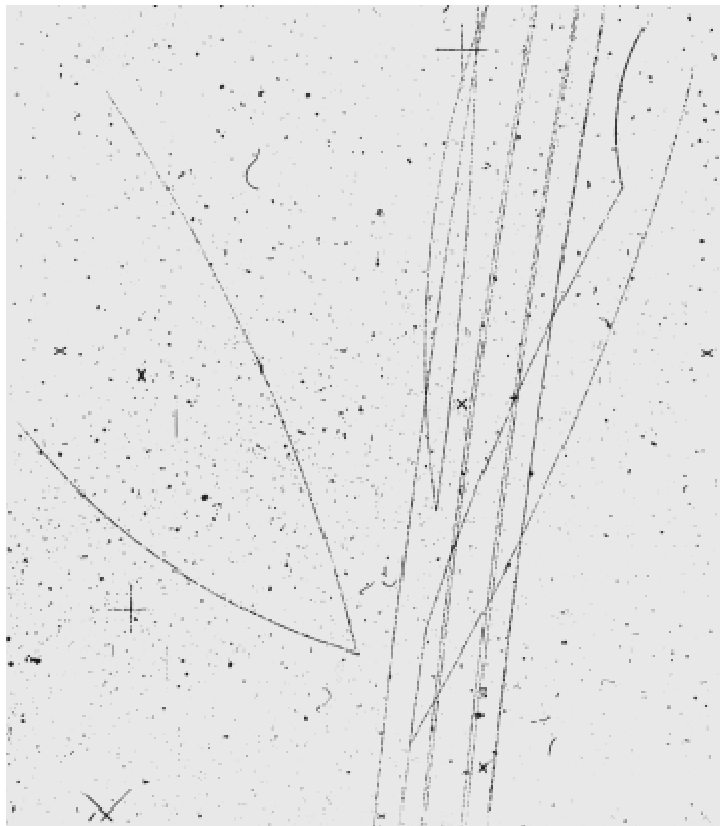


Abbildung 43: Spur eines V^0 -Teilchens⁷³

A.2 Screenshots

Aufgrund ihrer Größe habe ich die folgenden Screenshots nicht in den eigentlichen Text aufgenommen, sondern füge sie an dieser Stelle ein. Die Bilder zeigen den Aufbau der drei Karteikarten zu den Versuchsaufgaben⁷⁴.

⁷³ Siehe [15].

⁷⁴ Siehe Abschnitt „Versuchsaufgaben - Tasks“ auf Seite 19.

Tasks

✓ Task 1 Task 2 Task 3

Effective Range 140,86 cm

Particles 1

Interactions

Total	1
Elastic	0
Inelastic	1

Cross Section

Total	NaN	mb
Elastic	NaN	mb

Beam Profile [Depth / cm]

2401_710	3
----------	---

Multiplicity

Mean Charged

Arithmetic Mean	2,00
Mean Square Deviation	0,00

Estimate Mean of Plzero

From Conversions	0,00
From Mean Charged	0,50

V°s

2401_710	4
----------	---

Abbildung 44: Datenbereich - Task 1

Tasks

Task 1 ✓ Task 2 Task 3

π

Track 2401_710

Momentum [MeV / c]

Range	P_abs	P_x	P_y
0,00	157,82	117,95	104,85
2,42	157,82	107,04	115,96

From Curvature 157,82

From Range 59,14

Difference 98,68

μ

Track 2401_710

Momentum [MeV / c]

Range	P_abs	P_x	P_y
0,00	15,27	10,80	10,80
1,42	18,23	5,77	17,30
2,69	19,94	12,97	15,14
4,54	18,68	17,49	6,56

From Curvature 15,27

From Range 49,36

Difference 34,09

Abbildung 45: Datenbereich - Task 2

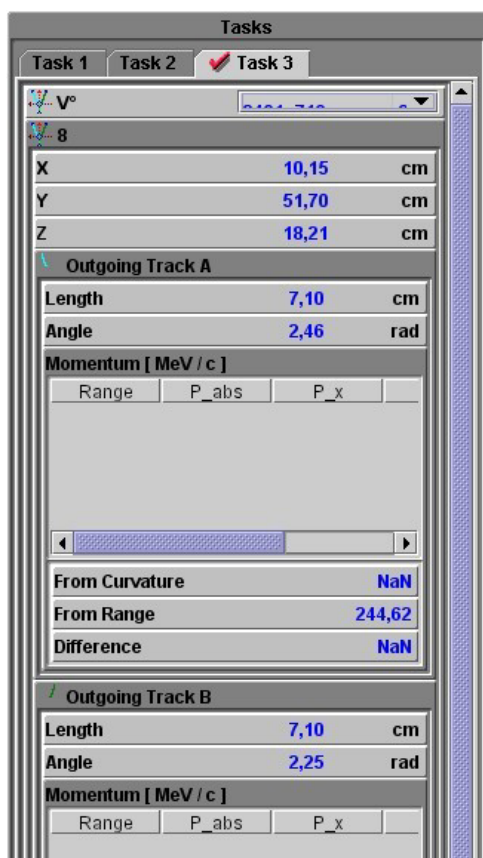


Abbildung 46: Datenbereich - Task 3 - oben

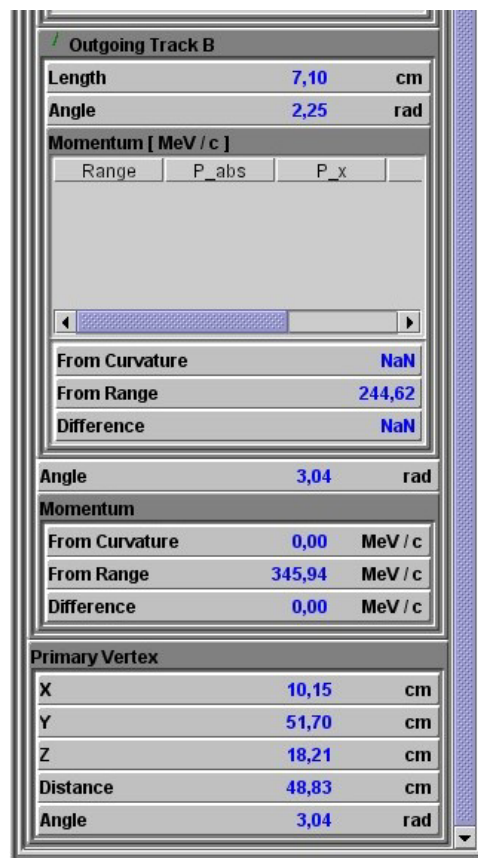


Abbildung 47: Datenbereich - Task 3 - unten

A.3 Bezugsmarken⁷⁵

Koordinaten der Bezugsmarken, so wie sie von der zweiten Kamera (View 2) gesehen wurden. Diese Daten wurden zur Berechnung der Vergrößerung herangezogen.

			X	Y	Form
Vorderseite	außen	11	-12,0952	25,0756	
		12	-12,2210	-24,9292	
		13	26,9688	-0,0146	
		14	63,4275	-0,0792	
		15	88,0191	-21,1236	
		16	87,9423	-21,3439	
	innen	21	-41,6552	0,1516	
		22	-28,6391	20,3096	
		23	-28,7633	-20,0759	
		24	-11,6034	-0,0631	
		25	8,1061	15,0159	
		26	8,0031	-20,1804	
		27	25,6695	-0,0414	
		28	41,2547	14,9506	
		29	41,1729	-20,2754	
		30	70,8963	20,0968	
		31	70,8151	-15,1849	
		32	83,8816	-0,1684	
		33	96,9884	14,8853	
		34	96,9340	-15,2609	
		35	106,3865	-0,2101	
Rückseite	innen	41	-34,8436	-0,0977	
		42	-9,6633	19,9568	
		43	-9,7536	-19,8586	
		44	20,5617	-0,0184	
		45	50,5337	16,8348	
		46	50,4928	-0,0712	
		47	50,4757	-20,0068	
		48	79,7525	19,8796	
		49	79,6943	-20,1009	

Tabelle 4: Koordinaten der Bezugsmarken bezüglich View 2

Die Bezugsmarken 11 bis 16 sind in die Vorderseite (Außenseite) der Kameraseitigen Glasplatte eingekerbt, die Marken 21 bis 35 in deren Rückseite (Innenseite, in Kontakt mit dem flüssigen Wasserstoff). Auf der Vorderseite (Innenseite, ebenfalls in Kontakt mit dem flüssigen Wasserstoff) des Beleuchtungsfensters befinden sich die Markierungen 41 bis 49.

⁷⁵ Die Koordinaten der Bezugsmarken und die Übersicht sind [1] entnommen.

Quellenverzeichnis

Literatur

Blasenkommer

- [1] Gerhild Seul, *Praktikumsversuche zur Einführung in die Hochenergiephysik*, Universität Bonn, 1977
- [2] *Anleitung zum Physikalischen Fortgeschrittenen Praktikum II*, Universität Bonn, 1997
- [3] *Protokolle zum Versuch Eigenschaften von Elementarteilchen*, Universität Bonn, 1998 – 2000
- [4] *Particle Physics Booklet*, Particle Data Group, Berkley, 2000
- [5] D.E. Groom, S.R. Klein, *Passage Of Particles Through Matter*, Particle Data Book, 1999

Physik

- [6] Horst Stöcker, *Taschenbuch der Physik*, 2. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1994
- [7] Helmut Vogel, *Gerthsen Physik*, 18. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [8] Paul A. Tipler, *Physik*, 1. Auflage (korrigierter Nachdruck), Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 1995

Mathematik

- [9] Bronstein, Semendjajew, Musiol, Mühlig, *Taschenbuch der Mathematik*, 2. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1995
- [10] Mentor Abitur Hilfe Band 50, *Mathematik – Lineare Algebra und Analytische Geometrie*, 7. Auflage, Mentor Verlag, München, 1994

Java

- [11] Stefan Middendorf, Reiner Singer, *JAVATM Programmierhandbuch und Referenz*, 2. Auflage, dpunkt Verlag, Heidelberg, 1999
- [12] Ralph Steyer, *Java 2 Kompendium*, Markt+Technik Verlag, München, 2001
- [13] Sun Microsystems, *Java - Dokumentation und Tutorien*, <http://java.sun.com>
- [14] Stefan Münz, *SelfHTML*, <http://selfhtml.teamone.de>

Allgemein

- [15] Google, *Internet-Suchdienst*, <http://www.google.de>, <http://groups.google.de>

Software**Entwicklung**

- [16] Sun Microsystems, *Java Software Development Kit 1.3.1*, <http://java.sun.com>
- [17] Sun Microsystems, *Java Runtime Environment 1.3.1*, <http://java.sun.com>
- [18] JetBrains, *IntelliJ 3.0.5*, <http://www.intellij.com>
- [19] Ingyu Kang, *Crimson Editor 3.45*, <http://www.crimsoneditor.com>
- [20] Impact Software, *Microangelo 5.56*, <http://www.impactsoftware.com>

Java-Software-Packages

- [21] Apache, *Xerces / Xalan*, <http://xml.apache.org>
- [22] JFree, *JFreeChart*, <http://www.jfree.org/jfreechart>
- [23] FreeHEP, *Java Analysis Studio*, <http://jas.freehep.org>
- [24] SyGem, *Jazz3D*, <http://www.jazz3d.co.uk>
- [25] Universität Oslo – Institut für Informatik, *Kurs IN104*, <http://www.ifi.uio.no/in104>

Browser

- [26] Mozilla.Org, *Mozilla 1.0.1*, <http://www.mozilla.org>
- [27] Netscape, *Netscape 7.0*, <http://www.netscape.com>
- [28] Opera Software, *Opera 6.0.5*, <http://www.opera.com>
- [29] Microsoft, *Internet Explorer 6*, <http://www.microsoft.com>

Tools

- [30] WinZip Computing Inc., *WinZip 8.1*, <http://www.winzip.com>
- [31] Adobe, *Acrobat 5 / Acrobat Reader 5.05*, <http://www.adobe.com>

Allgemein

- [32] Microsoft, *Windows 2000 Professional / Office 2000 Premium / HTML Filter*, <http://www.microsoft.com>

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 1: Konfiguration des <i>Java</i> Plug-in	4
Abbildung 2: Aufbau des Anwendungs-Fensters	9
Abbildung 3: File-Menü	10
Abbildung 4: Options-Menü	10
Abbildung 5: Help-Menü	10
Abbildung 6: Arbeitsbereich	12
Abbildung 7: Arbeitsbereich – Kontext-Menü	13
Abbildung 8: Navigation – Auswahl und „Stecknadeln“	14
Abbildung 9: Werkzeugleiste zum Ein- und Ausblenden von Objekten	14
Abbildung 10: Workspace – Kontext-Menü	15
Abbildung 11: Workspace – 3D Model	15
Abbildung 12: Workspace – Auswahl	16
Abbildung 13: Workspace – Fenster	17
Abbildung 14: Workspace-Beschriftung – Kontext-Menü	17
Abbildung 15: Information zu Messobjekt - Object Info	18
Abbildung 16: Datenbereich - Task 1	19
Abbildung 17: Datenbereich - Task 2	20
Abbildung 18: Datenbereich - Task 3	20
Abbildung 19: Zusatzfenster – Strahlprofil	21
Abbildung 20: Zusatzfenster – Impuls	21
Abbildung 21: Horizontaler und Vertikaler Splitter	21
Abbildung 22: Dialog zur Bildauswahl	22
Abbildung 23: Bedienelemente zur Bildmanipulation	23
Abbildung 24: Fenster zur Farbwahl	25
Abbildung 25: Integration der „Object Info“ eines Tracks in die Messwert-Anzeige	40
Abbildung 26: Load Session / Save Session – Dateiauswahldialoge	47
Abbildung 27: Save Report – Dateiauswahldialog	47
Abbildung 28: Vergrößerung	49
Abbildung 29: Stereo-Shift-Verfahren (Aufnahme 2403_710, View 1 und 2)	50
Abbildung 30: Tiefe eines Spurpunktes	51
Abbildung 31: Sagitta-Methode	52
Abbildung 32: 3-Punkte-Methode	53
Abbildung 33: Sagitta-Methode, dreidimensional	54
Abbildung 34: 3-Punkte-Methode, dreidimensional	56
Abbildung 35: Spurlänge - Sekanten	57
Abbildung 36: Spurlänge - Bogenlänge	58
Abbildung 37: Spurlänge - gemittelte Bogenlänge	58
Abbildung 38: Spurlänge - Bogenlänge, dreidimensional	59
Abbildung 39: Elektron-Positron-Paar	61
Abbildung 40: Beziehung zwischen Impuls und Energieverlust	65
Abbildung 41: Beziehung zwischen Impuls und Reichweite	66
Abbildung 42: δ -Elektron	68
Abbildung 43: Spur eines V^0 -Teilchens	70
Abbildung 44: Datenbereich - Task 1	71
Abbildung 45: Datenbereich - Task 2	71
Abbildung 46: Datenbereich - Task 3 - oben	72

Abbildung 47: Datenbereich - Task 3 - unten	72
Abbildung 48: Positionen der Bezugsmarken bezüglich View 2	74

Tabellen

Tabelle 1: Parameter für die Virtual Machine	4
Tabelle 2: Mögliche Parameter beim Aufruf der Software	8
Tabelle 3: Mauszeiger der Messobjekte	26
Tabelle 4: Koordinaten der Bezugsmarken bezüglich View 2	73

Indexverzeichnis

3-Punkte-Methode	53	Reichweite	33, 63
Abstand	28	vektoriell	63, 66
Anwendung		Installation	
ausführen	3	lokal	2
Applet	2	WWW-Server	2
Beschriftungen	9	Ionisation	63
Bethe-Bloch	63, 67	iterieren	64
Betriebssystem	1	Java	
Linux	1	1.3.1	1
Bezugsmarken	48, 73	kinetischen Energie	63
Bildschirmgröße	9	Kolorieren	
Blasenkammer		Farbwahl	25
Tiefe	49	Kontrast	
Blasenkammeraufnahme		Schwellenwert	24
anzeigen	23	konvertierte Photonen	61
Ausschnitt	13	Kreisbahn	62
invertieren	24	Kreisbogen	52
kolorieren	24	Radius	52
Kontrast	24	Kreispunkt	54
laden	23	Krümmung	30
verschieben	24	Krümmungsmessung	52
Blasenkammeraufnahmen		Ladungsvorzeichen	68
Liste	6	Lichtgeschwindigkeit	67
Manipulation	13	Lorentz-Kraft	62
manipulieren	23	Lorentz-Transformation	67
Bogenlänge	57, 58	Lot	52
Browser	1	Magnetfeld	62
Plug-in	3	senkrecht	62
Dreidimensional	54	Masse	67
Einheitsvektor	55	invariant	67
Einstellungen		mathematische Verfahren	48
Garbage-Collection	4	Mauszeiger	
Virtual Machine	4	Einfüge-Modus	26
Elektron-Positron-Paar	61	horizontal verschieben	26
Energie	67	Node verschieben	26
kinetisch	66, 67	Objekt verschieben	26
Energieverlust	62	Standard	26
Energieverluste	63	vertikal verschieben	26
Fehler	54	Messbereich	31
Flexibilität	55	Messobjekt	15
Formeln		auswählen	19
relativistisch	67	Beschreibung	25
Hardware	1	Distance	28
Hardwarebeschleunigung	4	Interaction	36
Impuls	20, 33, 62, 67	markieren	27
aus der Krümmung	35	Mauszeiger	26
aus der Reichweite	36	Name	18
Krümmung	33, 62	Node	25

Object-Info	18	korrigiert	66
Particle.....	27	Spurpunkt	
Ruler	31	Tiefe	51
Track.....	32	Startimpuls.....	64
Verbindungslinien	25	Stereo-Shift-Verfahren	24
verschieben.....	26	Stereo-Shift-Verfahren	34, 37, 42, 50
Vzero V^0	41	Strahlensatz.....	50
Mittelpunkt.....	52, 55, 58	Teilchenart	33
Kreis	54	Teilchenhypothese	36
Multiplizität.....	40, 60	Teilchentyp	
mittlere	60	Müon.....	35
mittlere geladene	60	Pion	35
Node		Tiefe	
verschieben.....	26	Spurpunkt.....	51
Orthonormal-Basis	55	Tiefenbestimmung	49
Paarbildung.....	61	Track	
Parameter		Einfüge-Modus	33
Software	6	Node hinzufügen.....	33
Virtual Machine.....	4	Umrechnungsfaktor	48
Path.....	3	Vergrößerung.....	48
Performance	2	Fehler	49
Primärvertex	36	verschieben	
Projektionstisch	48	Messobjekt.....	26
Radius.....	30, 52	Node.....	26
RAM.....	4	Tastatur	27
Reichweite.....	65, 67	Vielfachstreuung.....	62
Sagitta-Methode	30, 52	Vorschaubereich	22
schnelle Teilchen.....	63	Wechselwirkung	
Screenshots.....	9	assoziiert	41
Sekante	52	elastisch.....	36
Sekanten	56	Multiplizität	36
Sekundärvertex.....	41	Tiefe	36
Select Image Set.....	22	Werkzeugleiste	11, 14
Spirale.....	52, 62	Object Info	18
Splitter	7, 21	Wirkungsquerschnitt.....	27, 31, 40, 59
Spurlänge.....	33, 56	zentralen Ansicht	49
Dreidimensional	58		