Hertzhaimer-Gymnasium Trostberg

Kollegiatenjahrgang 2007/2009

Facharbeit

aus der Physik

Simulation der Bewegung geladener Teilchen im E- und B-Feld mit dem Computer

Verfasser: Peter Dahlberg

Kursleiter: Helmut Perzl

Abgabetermin: 30.01.2009

Facharbeit:	Mündliche Prüfung:
Erzielte Punkte: ______	Erzielte Punkte: ______
Gesamtergebnis:	Einfache Wertung: ______
	Doppelte Wertung: ______
Eintragung des Gesamtergebnisses am:	______

____

Unterschrift des Kursleiters

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Die Beeinflussung der Bewegung geladener Teilchen durch elektrische und magnetische Felder ist in der Physik von entscheidender Bedeutung beispielsweise in Form von Teilchenbeschleunigern oder Massenspektrographen. Aber auch in unserem Alltag war die Steuerung der Flugbahn geladener Teilchen in Form der Braunschen Röhre, die über ein halbes Jahrhundert lang die Basis für Fernsehgeräte bildete und erst seit einigen Jahren von anderen Techniken abgelöst wird allgegenwärtig.

Im folgenden wird nun ein Computerprogramm, das den Flug eines geladenen Teilchens durch homogene magnetische und elektrische Felder aus zweidimensionaler Perspektive simuliert beschrieben. Zuvor wird Grundlegendes zu den beiden Feldtypen und der Vorgehensweise bei der Bahnberchnung dargelegt.

2 Das elektrische und das magnetische Feld

2.1 Das elektrische Feld

2.1.1 Das elektrische Feld im Allgemeinen

> Das elektrische Feld ordnet jedem Raumpunkt die richtungsabhängige Größe der *elektrischen Feldstärke* $\vec{E}$ zu. Diese ist definiert durch die Kraft $\vec{F}$, die auf eine in dem Punkt befindliche Ladung Q wirkt:
>
> $$\vec{F} = Q\vec{E}$$
>
> Die Feldstärke ist also, anders gesagt, die Kraft pro Ladungseinheit. Das elektrische Feld ist ein Vektorfeld.[1]

Die elektrische Feldstärke hat die Einheit:

$$[E] = 1\frac{N}{As} = 1\frac{V}{m}$$

2.1.2 Das homogene elektrische Feld

[wpefeld] Eine spezielle Art des elektrischen Feldes ist das homogene elektrische Feld. Die Feldstärke $\vec{E}$ hat in jedem Raumpunkt innerhalb dieses Feldes den gleichen Betrag und die gleiche Richtung. Dies vereinfacht das Rechnen, da bei konstantem Q das selbe für die Kraft $\vec{F}$ gilt.

[1] [wpefeld] (Definition)

Zur Erzeugung eines homogenen elektrischen Feldes benötigt man zwei planparallele Kondensatorplatten[2] zwischen denen man eine Spannung U anlegt. Für den Betrag der Feldstärke gilt:

$$E = \frac{U}{d}$$

dabei ist d der Abstand der beiden Platten.

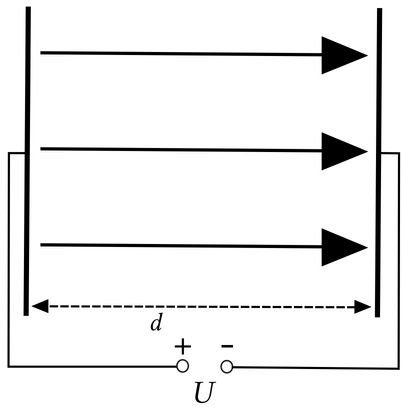


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Plattenkondensators

Die Feldstärke $\vec{E}$ zeigt in Richtung der negativ geladenen Platte, was der Richtung der Kraft $\vec{F}$ auf eine positive Probeladung entspricht. Bei einer negativen Probeladung ist die Kraft entgegen dem Feld gerichtet.

2.1.3 Bewegung geladener Teilchen im homogenen elektrischen Feld

[mlmlk1] Wählt man die y-Achse parallel zu den Feldlinien und die x-Achse senkrecht dazu, lässt sich die Bewegung eines geladenen Teilchens analog zum schrägen Wurf bzw. dem freien Fall beschreiben. In x-Richtung bewegt sich das Teilchen mit konstanter Geschwindigkeit $v_x(t) = v_{0x}$ und in y-Richtung beschleunigt durch die vom Feld verursachte Kraft mit $v_y(t) = v_{0y} + a_y t$. Dabei ist $a_y = \frac{F}{m}$.

Da die Bewegung analog zur Bewegung einer Masse im Schwerkraftfeld abläuft folgt das Teilchen für alle $v_x \neq 0$ einer Parabelbahn.

2.2 Das Magnetfeld

2.2.1 Das homogene Magnetfeld

[mlmlk1] Im homogenen Magnetfeld ist die magnetische Flussdichte[3] $\vec{B}$ überall gleich gerichtet und gleich groß.

[2] Randeffekte werden vernachlässigt
[3] $[B] = 1T$ (Tesla)

Ein annähernd homogenes Magnetfeld findet man beispielsweise zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten. Eine andere Möglichkeit ein solches Feld zu erzeugen ist ein Helmholtz-Spulenpaar. Dieses ermöglicht es die Stärke des Feldes beliebig zu verändern.

2.2.2 Kraft auf geladene Teilchen im Magnetfeld

[ross] Die Kraft auf einen Ladungsträger im Magnetfeld nennt man Lorentzkraft. Es gilt:

$$\vec{F_L} = Q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right)$$

Die Lorentzkraft wirkt also immer senkrecht zur von $\vec{B}$ und $\vec{v}$ aufgespannten Ebene. Es wirkt keine Kraft, wenn sich der Ladungsträger in Feldrichtung oder entgegen der Feldrichtung bewegt $\left(\vec{v} \parallel \vec{B}\right)$. Desweitern wirkt auf eine ruhende Ladung $(v = 0)$ ebenfalls keine Kraft.

Zur Bestimmung der Richtung der Lorentzkraft kann man die Die Drei-Finger-Regel (Abb. 2) benutzen. Für positiv geladene Teilchen benutzt man die rechte Hand und für negativ geladene die linke Hand.

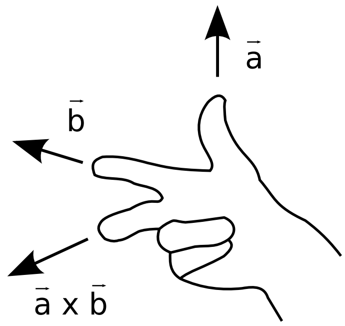


Abbildung 2: [wprhr] Die Drei-Finger-Regel $\left(\vec{a} \mathrel{\widehat{=}} \vec{v}, \vec{b} \mathrel{\widehat{=}} \vec{B}, \vec{a} \times \vec{b} \mathrel{\widehat{=}} \vec{F_L}\right)$

Für den Betrag der Lorentzkraft gilt: $F_L = QvB \cdot \sin\alpha$
Dabei ist α der Winkel zwischen $\vec{v}$ und $\vec{B}$.

2.2.3 Bewegung geladener Teilchen im homogenen Magnetfeld

[ross] Betrachtet man nur den Fall, dass sich ein Teilchen mit der Geschwindigkeit $\vec{v}$ senkrecht zur Feldrichtung bewegt, dann beschreibt es eine Kreisbahn. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Lorentzkraft immer senkrecht zur Flugrichtung wirkt und im laufe der Bewegung durch das Feld immer in Richtung eines bestimmten Punktes wirkt.

Zur Bestimmung des Radius r der Kreisbahn kann man also den Betrag Lorentzkraft mit dem Betrag Zentripetalkraft F_Z gleichsetzen. Mit $\alpha = 90°$ erhält man:

$$\begin{aligned} F_Z &= |F_L| && (1)\\ \frac{mv^2}{r} &= |QvB| && (2)\\ r &= \left|\frac{mv}{QB}\right| && (3) \end{aligned}$$

3 Berechnung der Flugbahn einer Probeladung mit dem Computer

3.1 Berechnung der Flugbahn mithilfe kleiner Zeitschritte

Bei einer beliebigen Anordnung von Feldern, die sich auch beliebig überlagern können ist die exakte Flugbahn eines geladenen Teilchens durch diese Anordnung nicht oder nur schwer rechnerisch zu bestimmen. Es ist aber möglich die Flugbahn anzunähern.

Die Kraft auf ein Teilchen mit einer bestimmten Ladung, Masse und Geschwindigkeit in einem einzelnen Feld kann berechnet werden[4]. Überlagern sich mehrere Felder in einem bestimmten Bereich der Anordnung lassen sich die Kräfte der einzelnen Felder zu einer Gesamtkraft Addieren. Da $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ [pfut] gilt, ist auch die Beschleunigung des Teilchens in einem bestimmten Punkt berechenbar.

Zu Beginn der Simulation befindet sich das Teilchen an einem bestimmten Punkt $P_0\,(x_0\,/\,y_0)$ und hat die Geschwindigkeit $\vec{v_0}$. Näherungsweise nimmt man nun an, dass sich das Teilchen für die Dauer einer bestimmten Zeitspanne Δt geradlinig mit konstanter Beschleunigung bis zu einem Punkt $P_1\,(x_1\,/\,y_1)$ bewegt. Mit den Bewegungsgleichungen [pfut] kann P_1 und die Geschwindigkeit $\vec{v_1}$ im Punkt P_1 berechnet werden:

$$\begin{aligned} \vec{v_1} &= \vec{v_0} + \frac{\vec{F_0}}{m} \cdot \Delta t && (4)\\ x_1 &= x_0 + v_{0x} \cdot \Delta t + \frac{F_{0x}}{2m} \cdot \Delta t^2 && (5)\\ y_1 &= y_0 + v_{0y} \cdot \Delta t + \frac{F_{0y}}{2m} \cdot \Delta t^2 && (6) \end{aligned}$$

Nun nimmt man den Punkt P_1 als Ausgangspunkt und wiederholt diese Proze-

[4]siehe 2.1.1 und 2.2.2

dur, dabei erhält man einen Punkt P_2. Dies lässt sich über eine beliebige Zahl an Schritten fortsetzen und es ergibt sich eine Näherung der Flugbahn.

Je kleiner man Δt wählt, umso kürzer werden die Geradenstücke und damit wird die Näherung genauer. Allerdings steigt damit natürlich der benötigte Rechenaufwand, um eine bestimmte Gesamtzeitspanne zu berechnen.

3.2 Automatische Anpassung der Schrittlänge

Es erweist sich in vielen Fällen als unpraktisch für die Zeitspanne Δt über die gesamte Simulationsdauer einen konstanten Wert zu verwenden. Probleme ergeben sich hier vor allem, wenn das Teilchen durch ein elektrisches Feld einer starken Beschleunigung ausgesetzt ist und sich die Geschwindigkeiten in den einzelnen Bereichen der Simulation stark unterscheiden. Dies führt unter Umständen dazu, dass die Flugbahn in Bereichen mit vergleichsweise hoher Teilchengeschwindigkeit zu ungenau berechnet wird. Desweiteren ergibt sich dadurch auch ein Nachteil für den Benutzer, da dieser für jede Simulationsanordnung einen passenden Wert für Δt finden muss.

Diese Probleme lassen sich entschärfen, indem man versucht Δt für jeden Schritt abhängig von der Beschleunigung a und der Geschwindigkeit v des Teilchens so zu wählen, dass es in jedem Schritt näherungsweise einen vorher festgelegten Weg Δs zurücklegt.

Zur Bestimmung von Δt wird die Beziehung $2 \cdot a \cdot \Delta s = v_1^2 - v_0^2$ [pfut] mit der Annahme $v_1 \approx \frac{\Delta s}{\Delta t}$ herangezogen. Eingesetzt und aufgelößt erhält man:

$$\Delta t \approx \frac{\Delta s}{\sqrt{2 \cdot a \cdot \Delta s \cdot v_0^2}}$$

Dies stellt sich als eine in diesem Anwendungsfall brauchbare Näherung heraus, die auf jeden Fall besser ist, als nur die Näherung $\Delta s \approx \frac{v_1}{\Delta t}$ zu verwenden, die wie oben beschrieben zu Problemen bei starker Beschleunigung führt.

3.3 Relativistische Massenzunahme bei hohen Geschwindigkeiten

[bsmasse] Da die Masse m eines Körpers mit zunehmender Geschwindigkeit v zunimmt muss dies natürlich auch in der Simulation berücksichtigt werden. Es gilt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Dabei ist m_0 die Ruhemasse des Körpers und c ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum[5].

Für $v \leq 0,1 \cdot c$ gilt in guter Näherung $m = m_0$. Diese Näherung wird auch im Programm verwendet.

Bei großen Geschwindigkeiten in der Nähe von c kann es in der Simulation vorkommen, dass das Teilchen innerhalb eines Zeitschrittes Δt die Grenzgeschwindigkeit c geringfügig überschreitet. Dies geschieht, da die Massenkorrektur nur mit der vor der Ausführung des Schrittes bekannten Geschwindigkeit v_0 erfolgen kann. Sollte dieser Fall eintreten wird im darauffolgenden Schritt mit einer Geschwindigkeit, die geringfügig kleiner[6] ist, als c weitergerechnet.

4 Das Programm „lsim"

4.1 Aufbau und Bedienung des Programms

4.1.1 Der grundlegende Aufbau des Programmfensters

Im folgenden wird nun der Aufbau der Benutzeroberfläche und die Bedienung des Programms beschrieben.

Wie in Abb. 3 zu erkennen ist gliedert sich das Fenster in vier Hauptbereiche. Im oberen Bereich befinden sich eine Menüleiste und eine Werkzeugleiste (Rot). Die Symbole in der Werkzeugleiste und die Menüeinträge dienen dazu bestimmte Aktionen auszulösen, wie das Berechnen der Flugbahn, öffnen und speichern von Dateien oder das Einfügen von Feldern. Im mittleren Teil des Fensters befinden sich auf der linken Seite mehrere Reiter (Orange), die dazu dienen Einstellungen und Zahlenwerte zu verändern oder anzuzeigen. Auf der rechten Seite befindet sich eine Zeichenebene, in der die Felder und das Teilchen angeordnet werden und das

---

[5] $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

[6] $v_{etwas\ kleiner} = c - 3 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s}$

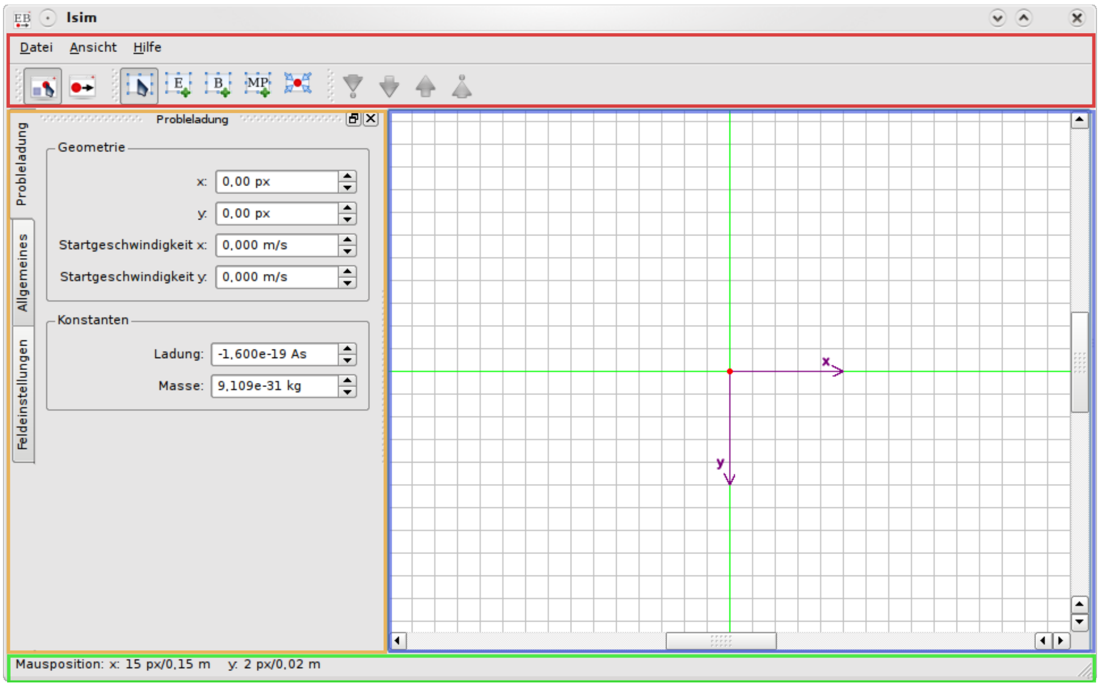
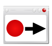


Abbildung 3: Die Benutzeroberfläche von lsim nach dem Start mit farblich markierten Hauptbereichen

Ergebnis der Simulation sichtbar wird (Blau). Am unteren Rand befindet sich eine Statusleiste (Grün) in der situationsabhängig verschiedene Informationen angezeigt werden.

4.1.2 Bearbeitungs- und Simulationsmodus

Das Programm kennt zwei verschiedene Zustände. Zum einen gibt es den Bearbeitungsmodus, der dazu dient Feldanordnungen zu erstellen und die Simulationsparameter zu verändern, die vor der Berechnung bekannt sein müssen. Nach dem Start des Programms befindet man sich in diesem Modus.

Zum anderen gibt es den Simulationsmodus, in den man mit folgendem Knopf in der Werkzeugleiste gelangt: 
Beim Wechsel in den Simulationsmodus wird automatisch die Flugbahn berechnet, was je nach eingestellter bzw. benötigter Anzahl an Rechenschritten einige Sekunden in Anspruch nehmen kann. Zurück in den Bearbeitungsmodus gelangt man mit folgendem Knopf: 

4.1.3 Erstellen und Bearbeiten einer Anordnung

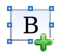
Wenn man das Programm startet oder wenn man im Menü „Datei“ den Punkt „Alles Zurücksetzen“ auswählt sieht man eine leere Zeichenfläche mit einem Koordinatensystem in dessen Mittelpunkt sich die Probleadung befindet. Das Koordinatensystem enthält bis auf die x- und y-Richtung keine Beschriftung aber es lassen sich in der Statusleiste die Koordinaten ablesen, an denen sich der Mauszeiger befindet.

Einfügen eines elektrischen Feldes

Um ein elektrisches Feld einzufügen, muss man in der Werkzeugleiste auf folgenden Knopf klicken: 

Dieser erscheint daraufhin versenkt. Jetzt klickt man mit der linken Maustaste an eine beliebige Stelle inerhalb der Zeichenfläche, hält die Maustate gedrückt und zieht das Feld nach rechts unten auf. Ein elektrisches Feld erscheint in blauer Farbe und die Linien im inneren geben die Feldrichtung an.

Einfügen eines Magnetfeldes

Analog zum elektrischen Feld läuft das Einfügen beim Magentfeld ab. 

ist der dafür zuständige Knopf. Ein Magnetfeld erscheint in grauer Farbe.

Einfügen einer Metallplatte

Eine Metallplatte dient dazu die Probeladung zu absorbieren. Dies wirkt sich im Programm dadurch aus, dass die Simulation an dem Punkt endet, an dem die Flugbahn die Metallplatte kreuzt oder berührt. Eine Metallplatte wird nach einem Klick auf den Knopf 

von links nach rechts „aufgezogen“. Sie erscheint in Hellblau und hat eine Dicke von $10px$.

Platzieren der Probeladung

Nach einem Klick den Knopf  lässt sich die Probeladung durch einfaches klicken innerhalb der Zeichenfläche an eine beliebige Stelle setzen.

Verändern der Feldanordnung

Ein einzelnes Feld oder eine Metallplatte innerhalb der Zeichenfläche kann durch einen Klick ausgewählt werden und mit gedrückter linker Maustaste verschoben werden. Neben einem ausgewählten Objekt erscheinen schwarze Kästchen, mithilfe derer man die Größe des Objektes verändern kann. Durch drücken der Taste „Entf“ wird ein ausgewähltes Objekt wieder entfernt.

Da sich die einzelnen Objekte überlappen können, ist es manchmal notwendig einzelne davon nach hinten bzw. nach vorne zu schieben. Der Knopf  verschiebt das gewählte Objekt um eine Ebene nach vorne und der Knopf  ensprechend um eine Ebene nach hinten. Um ein Objekt nach ganz vorne bzw. nach ganz hinten zu schieben verwendet man folgende Knöpfe:  

Zur Durchführung dieser Aktionen muss der Knopf  hervorgehoben sein.

Eingabe und Darstellung numerischer Werte

Es ist zu beachten, dass bei der Eingabe und Darstellung von Zahlenwerten das auf dem Computer eingestellte Dezimaltrennzeichen verwendet wird. Zahlen mit Zehnerpotenzen haben die Form „2,3e+21“, was $2,3 \cdot 10^{21}$ entspricht. Bei negativem Exponenten entspricht „2,3e-21“ der Zahl $2,3 \cdot 10^{-21}$. Die Eingabefelder, bei denen es zweckmäsig ist unterstützen die Eingabe von Zehnerpotenzen in der angegebenen Form.

Der Reiter „Feldeinstellungen“

Der Inhalt dieses Reiters ist abhängig vom gewählen Feld bzw. der gewählten Metallplatte. Für alle Fälle befinden sich dort Eingabefelder mit denen sich Größe und Position des Objektes ändern lassen. Metallplatten und elektrische Felder können um einen beliebigen ganzzahligen Winkel gedreht werden. Die Drehung erfolgt dabei rechtsherum. Bei elektrischen Feldern und Magnetfeldern lässt sich die Feldstärke bzw. die Flussdichte einstellen. Zusätzlich kann bei Magnetfeldern ausgewählt werden, ob das Feld in die Ebene hinein oder aus der Ebene heraus zeigen soll.

Der Reiter „Probeladung“

Im Reiter „Probeladung“ lässt sich die Position der Probleladung festlegen. Zusätzlich kann eine Startgeschwindigkeit für das Teilchen, aufgeteilt in x- und y-Richtung festgelegt werden. Ebenfalls eingestellt werden können Ruhemasse und Ladung des Teilchens. Hierbei enstsprechen die voreingestellten Werte denen des Elektrons.

Der Reiter „Allgemeines“

Hier kann die maximale Anzahl an Rechenschritten angegeben werden. Wenn das Teilchen während des Fluges an eine Metallplatte stößt sind mitunter weniger

Schritte nötig, als angegeben. Es kann außerdem die Länge Δt eines Zeitschrittes angegeben werden[7].

Dieser Wert wird ignoriert, wenn die automatische Bestimmung der Zeitschrittlänge aktiviert wird. Ist diese Option gewählt, was in der Voreinstellung der Fall ist, kann auch der anzunähernde Wegunterschied Δs in Pixel eingestellt werden[8].

Das letzte Eingabefeld ermöglicht die Einstellung des Maßstabes innerhalb der Simulation. Die Voreinstellung ist: $1px \mathrel{\widehat{=}} 1cm$.

4.1.4 Betrachten des Berechnungsergebnises

Befindet man sich im Simulationsmodus wird im Zeichenbereich die errechnete Flugbahn des Teilchens angezeigt. Diese lässt sich im Reiter „Allgemeines“ auch ausblenden.

Durch einen Klick auf  startet das Teilchen seinen simulierten Flug entlang der Bahn. Der Knopf verändert sich dabei zu . Durch einen erneuten Klick darauf hält das Teilchen an seiner aktuellen Position an. Ein Klick auf  hält die Animation ebenfalls an, versetzt das Teilchen aber wieder an seinen Anfangspunkt. Im Reiter „Allgemeines“ lässt sich festlegen, wie schnell die Animation sein soll. Man gibt entweder eine durchschnittliche Geschwindigkeit in $\frac{px}{s}$ an oder einen Wert in Sekunden, wie lange die Animation über die ganze Flugbahn dauern soll.

In „Allgemeines“ wird auch die „reale Simulationsdauer“ angezeigt. Gemeint ist damit die Zeit, die ein Teilchen mit den eingestellten Eigenschaften in der Realität benötigen würde, um die Flugbahn zu durchlaufen.

Im Reiter „Daten“ wird während der Animation die aktuelle Position des Teilchens angezeigt. Desweiteren kann hier, während die Animation läuft die reale Geschwindigkeit des Teilchens in diesem Punkt abgelesen werden. Die Anzeige dieser Werte kann in machen Situationen ein starkes Ruckeln der Animation hervorrufen und muss deshalb im selben Reiter extra aktiviert werden.

4.2 Anwendungsbeispiel: Simulation eines Wienfilters

4.2.1 Funktionsweise des Wienfilters

[wpwien] Der Wien Geschwindigkeitsfilter lässt nur Teilchen einer bestimmten Geschwindigkeit v, wie in Abb. 4 zu sehen ist passieren. Weicht die Geschwindigkeit von diesem Wert ab, passiert das Teilchen den Filter nicht geradlinig und kann die

[7] vgl. 3.1
[8] vgl. 3.2

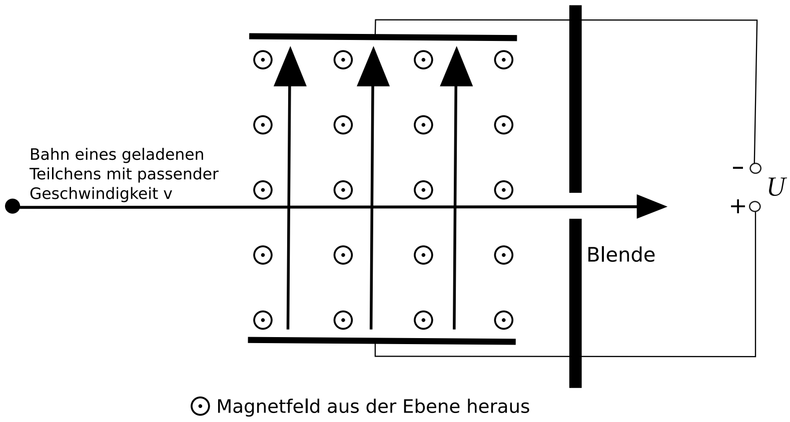


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Wien Filters

Blende nicht durchqueren. Dabei ist die Größe und das Vorzeichen der Ladung Q, die das Teilchen trägt egal, solange $Q \neq 0$ ist. Wenn $Q = 0$ ist wirken die Felder gar nicht auf das Teilchen und jedes Teilchen würde den Filter geradlinig durchqueren.

Die Felder sind senkrecht zueinander angeordnet und die Flugbahn des Teilchens steht jeweils senkrecht auf beiden Feldern. Außerdem sind die Felder so angeordnet, dass die Lorentzkraft F_L genau entgegen der Coulombkraft F_C des elektrischen Feldes wirkt. Setzt man jetzt die Beträge der beiden Kräfte gleich, erhält man eine Bedingung für v.

$$|F_L| = |F_C| \tag{7}$$

$$|QvB| = |QE| \tag{8}$$

$$v = \left|\frac{E}{B}\right| \tag{9}$$

4.2.2 Aufbau eines Wienfilters im Programm

Wie in Abb. 5 zu erkennen ist muss man ein elektrisches Feld und ein Magnetfeld erzeugen[9] und Beide genau übereinander legen. Die Ausrichtung der Felder muss nicht verändert werden, da die Voreinstellungen passen. Die elektrische Feldstärke E berägt in diesem Beispiel $10{,}0\frac{V}{m}$ und die magnetische Flussdichte B beträgt $2{,}0 \cdot 10^{-5} T$.

Rechts vom Feld ordnet man zwei Metallplatten zu einer Blende an. Die obere Platte ist um 270° gedreht, die untere um 90°. Im abgebildeten Beispiel haben beide jeweils den Abstand $0{,}1px$ von der x-Achse, so dass ein schmaler Spalt offen

[9] Zur Erzeugung und Veränderung von Objekten siehe auch 4.1.3

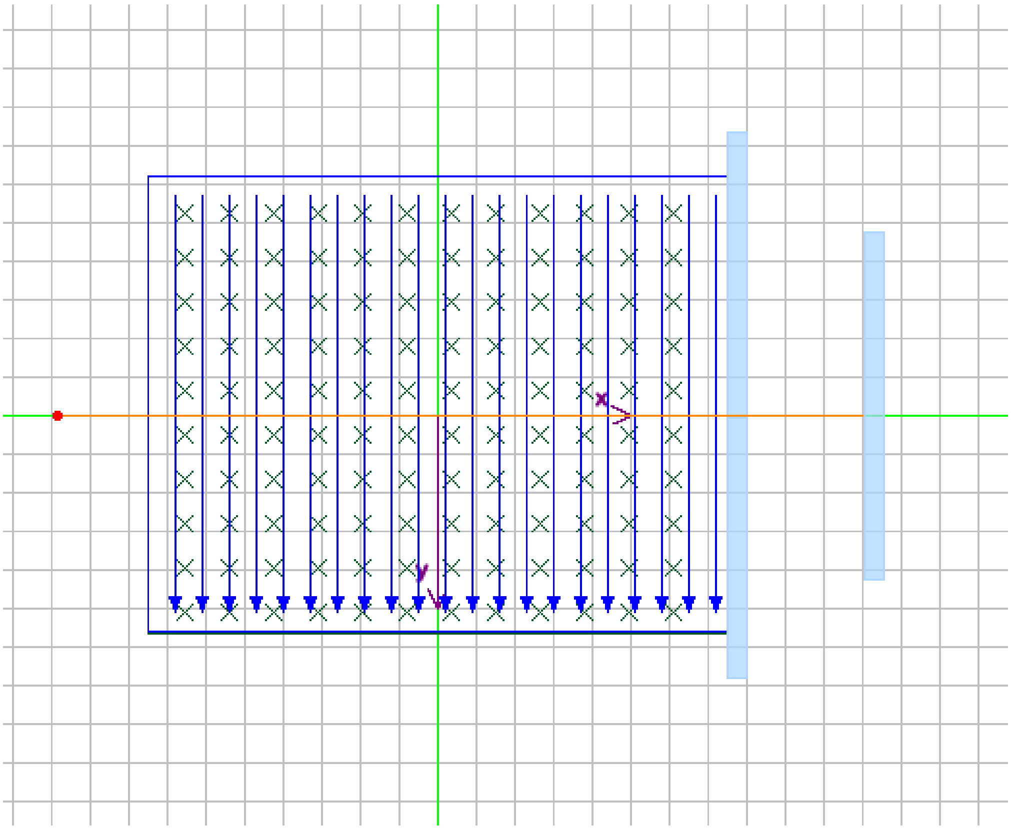


Abbildung 5: Beispielaufbau eines Wienfilters in lsim mit der Flugbahn eines Teilchens, das die Geschwindigkeit $v = 5,0 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$ besitzt

bleibt. Dahinter kann noch eine Metallplatte platziert werden, um das Teilchen aufzufangen.

Die Probleadung platziert man auf der linken Seite vor den Feldern auf der x-Achse und gibt ihr eine positive Anfangesgeschwindigkeit in x-Richtung. Man stellt fest, dass das Teilchen nur bei der aus (9) berechneten Geschwindigkeit $v = 5,0 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$ die Anordnung geradlinig durchfliegt und die Blende durchqueren kann.

Dieses Beispiel ist auch in der beigefügten Datei „wien_klein.lsm“ zu finden, die mit dem Programm geöffnet werden kann.

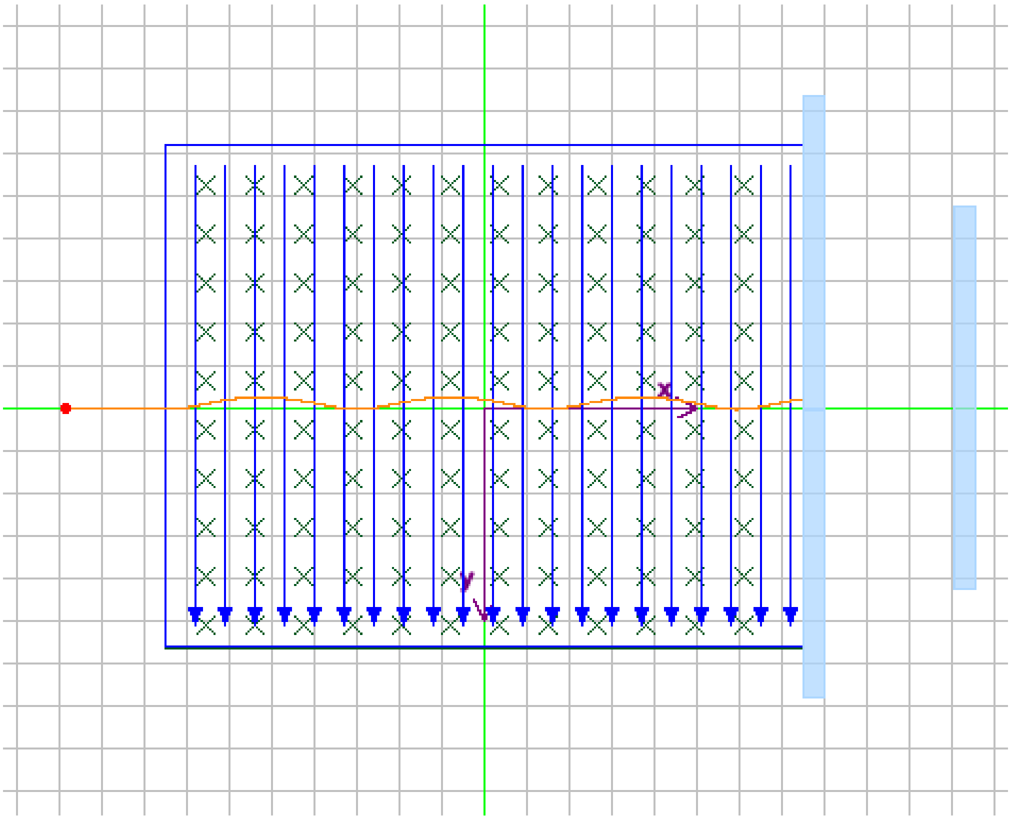


Abbildung 6: Hier hat das Teilchen keine passende Geschwindigkeit und durchfliegt die Blende somit nicht; $v = 4,5 \cdot 10^5 \frac{m}{s}$

Nachwort

Das Programm „lsim“ ist in der Programmiersprache C++ geschrieben und verwendet die Klassenbibliothek Qt[10]. Für die Verwendung von Qt habe ich mich entschieden, da es damit möglich ist relativ einfach grafische Benutzeroberflächen zu erstellen. Außerdem sind damit erstellte Programme unter allen gängigen Betriebsystemen übersetzbar und lauffähig. Dies war mir besonders wichtig, da ich Linux verwende und das Programm trotzdem auf dem weit verbreiteten Windows lauffähig sein sollte.

Das Programm „lsim“ ist freie Software und steht unter der GPL[11] Version 2 oder höher. Qt ist in der verwendeten „Open Source Edition“ unter GPL Version 2 und GPL Version 3 erhältlich. Die verwendeten Symbolgrafiken entstammen dem „Oxygen Icon Theme“[12], das unter der LGPL Version 3 oder höher erhältlich ist und wurden zum Teil von mir verändert.

[10] für weitere Informationen siehe `http://www.qtsoftware.com/`

[11] Kopien der Softwarelizenzen finden sich im Quellcode Verzeichnis von „lsim“

[12] Das „Oxygen Icon Theme“ ist Teil des KDE Projekts, siehe `http://www.kde.org/`

Das schreiben dieses Programms bedeutete für mich eine gewisse Herausforderung, da ich mich erst in C++ und Qt einarbeiten musste. Allerdings konnte ich dadurch meine Programmierkenntnise um einiges erweitern. Ich hoffe, dass das Programm auch zu etwas anderem nützlich ist, als Gegenstand einer Facharbeit zu sein wünsche dem Benutzer viel Freude bei der Benutzung.

Dieses Dokument wurde mit dem Textsatzsystem LaTeX erstellt.

Literaturverzeichnis

Bücher

[mlmlk1] Müller, A., Leitner, E., Mráz, F., Physik, Leistungskurs 1.Semester, Elektrische und magnetische Felder, München, Ehrenwirth, 1991[11]

[pfut] Hammer, A., Hammer, H., Hammer, K., Physikalische Formeln und Tabellen, München, J. Lindauer Verlag, 2002[8]

Internetquellen

[ross] Rossbach, J., Notizen zur Vorlesung Physik II – WS 2006/07, Das magnetische Feld, `http://www.desy.de/~schleper/lehre/physik2/WS2006_07/V_Magnetismus.pdf` (26.01.2009)

[bsmasse] Szallies, Bernhard, Die relativistische Masse, `http://www.szallies.de/RelativistischeMasse.pdf` (25.01.2009)

[wpefeld] Wikipedia, Seite „Elektrisches Feld“, `http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektrisches_Feld&oldid=54383375&printable=yes` (29.12.2008)

[wpwien] Wikipedia, Seite „Geschwindigkeitsfilter“, `http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Geschwindigkeitsfilter&oldid=55777339&printable=yes` (25.01.2009)

[wprhr] Wikipedia, Datei:RHR.svg, `http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RHR.svg&printable=yes` (06.01.2009)

„Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.“

__________________, den ______________ ________________________

Ort Datum Unterschrift des Schülers