

# Versuch 1.1: Magnetfeldmessung

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene  
11. Mai 2021



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



---

## 1 Einleitung

---

### 1.1 Ziel des Versuches

---

In Beschleunigeranlagen, wie z.B. dem S-DALINAC, aber auch dem LHC am CERN, werden Magnete eingesetzt, um Parameter der zu beschleunigenden Teilchenpakete zu beeinflussen. Die genaue Kenntnis der Eigenschaften des Magnetfeldes ist dabei für die Berechnung der Strahldynamik, die einer Auslegung des Gesamtsystems voransteht, wie auch den Betrieb, von außerordentlicher Bedeutung. Im Rahmen dieses Versuches sollen Messungen an verschiedenen Magneten vorgenommen werden und ihr Einfluss auf die Strahldynamik diskutiert werden. In diesem Zusammenhang werden wichtige Größen wie die Feldglattheit von Dipolen oder der Gradient eines Quadrupols bestimmt.

### 1.2 Stichpunkte

---

- Hall-Effekt
- Hysterese
- Ferromagnetismus
- Elektromagnetismus
- Dipolmagnet
- Quadrupolmagnet
- Bewegung geladener Teilchen im elektromagnetischen Feld
- Elektromagnetische Induktion
- Magnetische Multipole
- Magnetfeldmessung mit rotierender Spule
- Numerische Integration (Trapezformel)
- Diskrete Fourier Transformation

### 1.3 Messplatz

---

Der Messplatz besteht aus einer 3-Achsen-Hallsonde mit dazugehörigem Gauß-Meter sowie einer Positioniereinheit für diese Sonde. Zur Messung des Magnetfeldes wird die Hallsonde auf einem Raster bewegt. Die Positionierung erfolgt dabei über eine Computer-gesteuerte CNC-Flachbetteinheit mit zusätzlicher z-Achse. Die Messwerte werden direkt in ein txt-File geschrieben. Ein Quadrupolmagnet und ein so genannter Steerer (ein schwacher Dipolmagnet) mit entsprechenden Netzteilen stehen zum Vermessen bereit. Der Versuch wird ergänzt durch eine rotierende Spule und einem Oszilloskop, womit die Multipolkomponenten des Quadrupols vermessen werden können.

---

## 2 Physikalische Grundlagen

---

### 2.1 Hall-Effekt

---

Der Hall-Effekt, 1879 von Edwin Hall entdeckt, beschreibt das Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem stationären Magnetfeld befindet. Die Spannung fällt dabei senkrecht zur Stromfluss- als auch Magnetfeldrichtung am Leiter ab und wird Hall-Spannung  $U_H$  genannt.

Durch das äußere Magnetfeld wirkt auf die Ladungsträger, im Allgemeinen Elektronen, die Lorentzkraft. Diese lenkt die Elektronen senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung ab, so dass es zu einem Elektronenüberschuss auf der einen und einem Elektronenmangel auf der anderen Seite kommt. Diese Ladungstrennung ist mit der eines Kondensators vergleichbar. Analog dazu bildet sich ein elektrisches Feld aus, das eine der Lorentzkraft entgegengesetzte Kraft auf die Elektronen ausübt. Im Falle eines Kräftegleichgewichtes stoppt die Ladungstrennung. Die Hall-Spannung  $U_H$  kann wie bei einem Kondensator gemessen werden und folgt Strom- und Magnetfeldänderungen instantan.

Die Größe der Hall-Spannung  $U_H$  kann mit Hilfe der Formel

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (1)$$

aus Stromstärke  $I$ , magnetischer Flussdichte  $B$ , Dicke der Probe  $d$  (parallel zu  $B$ ) und einer Materialkonstanten, der so genannten Hall-Konstante  $R_H$  berechnet werden.

Eine der am weitesten verbreiteten Anwendung des Hall-Effektes ist die Messung der magnetischen Flussdichte mit sogenannten Hall-Sonden. Ist der durch den Leiter fließende Strom bekannt, so kann aus Gl. 1 die magnetische Flussdichte  $B$  aus der gemessenen Hall-Spannung berechnet werden.

---

### 2.2 Teilchen im elektromagnetischen Feld

---

Beim Durchgang eines geladenes Teilchens durch ein magnetisches bzw. elektrisches Feld wirken die elektrostatische Kraft und die Lorentzkraft auf das Teilchen, in diesem Fall mit der Ladung  $e$ :

$$\vec{F} = e \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (2)$$

Neben der Einführung eines Koordinatensystem wie in Abb. 1.1

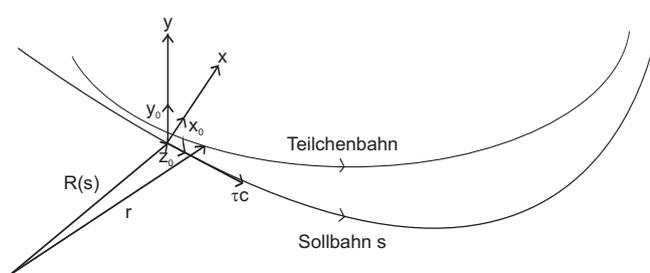


Abb. 1: Die Koordinaten eines Teilchens werden im Bezug auf das sich mitbewegende Koordinatensystem des Sollteilchens beschrieben.

werden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Die Bewegung der Teilchen erfolgt parallel zur  $s$ -Achse, d.h.  $\vec{v} = (0, 0, v_0)$
- Magnetfelder haben nur transversale Komponenten  $\vec{B} = (B_x, B_y, 0)$

Somit ergibt sich in der Horizontalen ein Kräftegleichgewicht zwischen der elektromagnetischen Feldkraft  $F_x = -evB_y$  und der Zentrifugalkraft  $F_z = mv^2/R$ , mit  $m$  als der Masse des Teilchens und  $R$  als Bahnradius. Mit dem Teilchenimpuls  $p = mv$  lässt sich dieses Gleichgewicht wie folgt schreiben:

$$\frac{1}{R(x(s), y(s), z(s))} = \frac{e}{p} B_y(x(s), y(s), z(s)) \quad (3)$$

Analoges gilt für die vertikale Ablenkung des Teilchens.

## 2.3 Dipolmagnete

Als Dipolmagnet bezeichnet man Magnete, die einen Nord- und einen Südpol aufweisen. In der Regel bestehen sie aus einem Joch zur Formung des Feldes und den stromdurchflossenen Spulen, die das Magnetfeld erzeugen. Im Spalt zwischen den Polen entsteht ein durch den Stromfluss regelbares, homogenes Magnetfeld. Abb. 1.2 zeigt beispielhaft den Aufbau eines sogenannten C-Magneten.

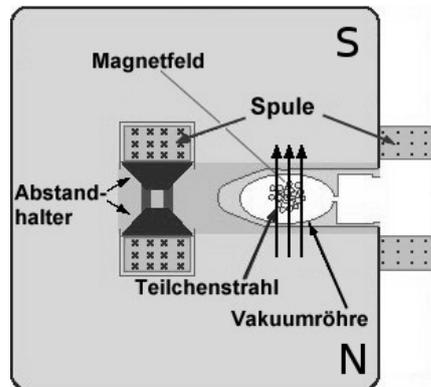


Abb. 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Dipols.

In Teilchenbeschleunigern werden Dipolmagneten zur Strahlablenkung genutzt, man spricht dabei auch von Ablenkmagneten. Die Form der Polschuhe bestimmt dabei die Eigenschaften des Magnetfeldes, wie z.B. die Größe des homogenen Feldbereiches und die Feldglattheit. Die Feldglattheit beschreibt dabei die noch akzeptablen Feldfehler und begrenzt somit den homogenen Feldbereich. Am häufigsten werden ebene Polflächen verwendet, da sie ein homogenes Feld zwischen den Polschuhen entstehen lassen. Die Teilchenbewegung in diesem Feld erfolgt gemäß der Lorentzkraft auf einer Kreisbahn senkrecht zum Feld und ist proportional zur magnetischen Flussdichte  $B$ . In Abb. 1.3 ist ein Dipol mit C-förmigem Joch und zwei Spulen dargestellt.

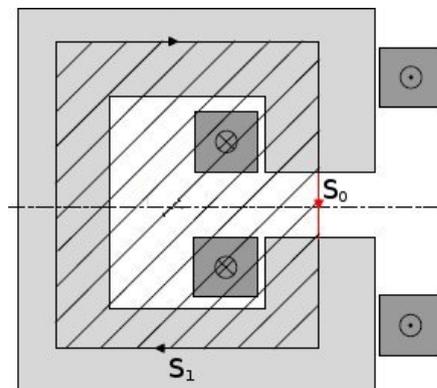


Abb. 3: Integrationsweg in einem Dipolmagneten

Ist der Polschuhabstand klein im Vergleich zu den Ausmaßen des Magneten, kann der magnetische Fluß durch den Magneten und den Luftspalt als konstant angenommen werden. Mit dem Ampèreschen Gesetz  $\int_{\partial a} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \int_a \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$  ergibt sich:

$$H_i s_i + H_0 s_0 = V_m \quad (4)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} B_i s_i + \frac{1}{\mu_0} B_0 s_0 = NI \quad (5)$$

Unter der Annahme eines ferromagnetischen Jochmaterials gilt  $\mu_r \gg 1$ , somit folgt

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{s_0} \quad (6)$$

mit  $\mu_0$  = Magnetische Feldkonstante,  $\mu_r$  = Permeabilitätszahl des Jochmaterials,  $I$  = Spulenstrom,  $N$  = Windungszahl,  $s_0$  = Luftspalt des Joches und  $s_1$  = Eisenweg des Joches.

## 2.4 Quadrupolmagnete

Quadrupolmagnete dienen der Fokussierung des Teilchenstrahls. Sie bestehen aus zwei Nord- und zwei Südpolen, so dass sich ein inhomogenes Feld zwischen den Polen bildet. Abbildung 1.3 zeigt die Pole, Feldlinien und die auf negativ geladene Teilchen, die in die Zeichenebene fliegen, wirkenden Kräfte in einem Quadrupol.

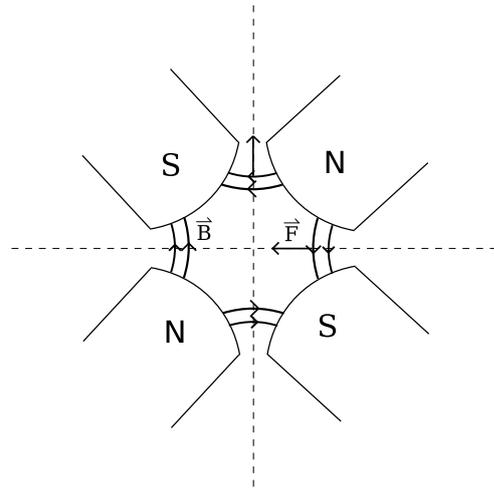


Abb. 4: Schematische Darstellung der magnetischen Feldlinien und der auf einen aus der Zeichenebene fliegenden Strahl negativ geladener Teilchen wirkenden Kräfte in einem Quadrupol.

Bei hyperbolisch geformten Polen nimmt die Magnetfeldstärke linear mit dem Abstand zum Zentrum des Magneten zu. Dadurch werden die Teilchen, die sich weiter weg vom Zentrum befinden, stärker abgelenkt als welche, die sich dichter am Zentrum befinden. Dies führt analog zu optischen Linsen zu einem Brennpunkt, auf den die Teilchen abgelenkt werden. Allerdings fokussiert ein Quadrupol im Gegensatz zu einer optischen Linse nur in einer Ebene und defokussiert in der anderen. Die Stärke der Fokussierung ist abhängig vom Gradienten des Quadrupols. Dieser berechnet sich wie im folgenden dargestellt. In Abb. 1.4 ist der Integrationsweg in einem Quadrupolmagneten dargestellt. Der Integrationsweg startet im Mittelpunkt des Magneten und ist wie folgt unterteilt: vom Mittelpunkt bis zum Pol (1), durch das Eisenjoch (2) und entlang der x-Achse zurück zum Mittelpunkt (3). Unter Vernachlässigung des magnetischen Widerstandes des Eisenjoches ( $\mu_r \gg 1$ ) erhalten wir ähnlich dem Dipol

$$\oint H \cdot ds = \int_{s_1} H_1 \cdot ds + \int_{s_3} H_3 \cdot ds = N \cdot I \quad (7)$$

Da das Feld im Quadrupol vom Gradienten  $g$ , mit  $B_x = gy$  und  $B_y = gx$ , definiert wird, ergibt sich entlang des Integrationsweges  $s_1$

$$H_1 = \frac{g}{\mu_0} \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{g}{\mu_0} r \quad (8)$$

Entlang der x-Achse ( $s_3$ ) ist das Feldintegral null, da  $H \perp s_3$  ist. Es ergibt sich somit

$$\int_0^{r_0} H_1 \cdot dr = \frac{g}{\mu_0} \int_0^{r_0} r \cdot dr = \frac{g}{\mu_0} \frac{r_0^2}{2} = N \cdot I \quad (9)$$

oder

$$g = \frac{2\mu_0 NI}{r_0^2} \quad (10)$$

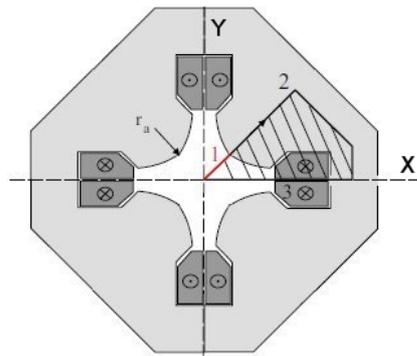


Abb. 5: Integrationsweg in einem Quadrupolmagneten

## 2.5 Magnetische Länge

Bei Strahlführungskomponenten, wie dem Quadrupol, erfolgt die Berechnung der Strahldynamik mit Hilfe der effektiven Länge (= magnetische Länge) aus Abb. 6. Es wird vereinfacht von einem Magnetfeld ausgegangen, das über die effektive Länge einen Maximalwert aufweist. Das Randfeld des Magneten ist durch instantan aufsteigende und abfallende Flanken genähert. Der Abstand der Flanken wird über den Flächenausgleich bestimmt. Für einen Dipolmagneten lautet das Integral

$$L_{eff} = \frac{1}{B_{max}} \int_{-\infty}^{+\infty} B(r) \cdot dr. \quad (11)$$

Bei der Berechnung der effektiven Länge für Quadrupol-, Sextupol- oder Magnete höherer Ordnung würde die magnetische Flussdichte  $B$  durch den Feldgradienten  $g$  bzw. ab dem Sextupol durch analoge Größen ersetzt.

Die Vereinfachungen erlauben die stückweise Lösung der Hill'schen Differentialgleichungen, welche die Bewegungsgleichungen für geladene Teilchen unter Magnetfeldeinfluss darstellen.

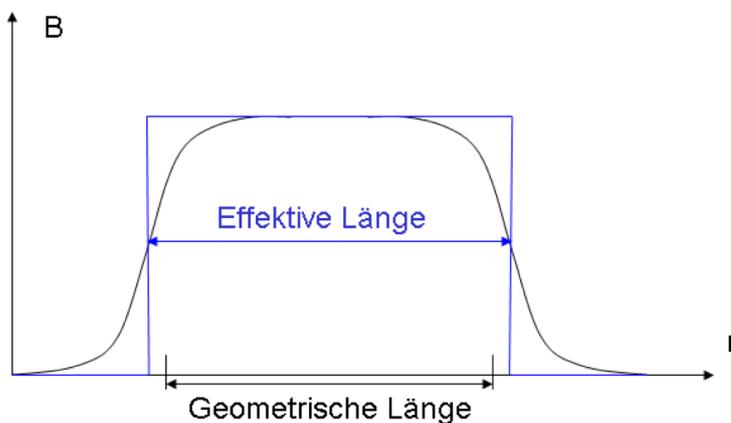


Abb. 6: Die magnetische Flussdichte eines Magneten in Abhängigkeit des Ortes und die resultierende effektive Länge.

## 2.6 Multipolentwicklung

Jedes Magnetfeld lässt sich als Überlagerung aus verschiedenen Multipolenkomponenten darstellen. Ist in einem Magneten der Polschuhabstand  $s_0$  oder der Aperturradius  $r_0$  viel kleiner als die Länge des Magneten,

verschwindet  $B_z$  und die Feldverteilung wird als eben betrachtet. Die Entwicklung des Magnetfeldes um den Ursprung wird zum Beispiel an der Magnetfeldkomponente  $B_y$  durchgeführt.

$$B_y(x) = B_{y0}(0) + \frac{\partial B_y}{\partial x} \Big|_0 x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} \Big|_0 x^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 B_y}{\partial x^3} \Big|_0 x^3 + \dots, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{e}{p} B_y(x) &= \frac{1}{R} + gx + \frac{1}{2!} m x^2 + \frac{1}{3!} o x^3 + \dots \\ &= \text{Dipol} + \text{Quadrupol} + \text{Sextupol} + \text{Oktupol} + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Die Variable  $R$  beschreibt den Krümmungsradius einer Bahn, die von einem Teilchen mit Ladung  $e$  und relativistischem Impuls  $p$  beschrieben wird, und ist die charakteristische Größe eines Dipolmagneten. Der Quadrupolterm beinhaltet den Feldgradienten  $g$ , während die Variable  $m$  die Stärke des Sextupols angibt. Werden nur die ersten beiden Multipole, also Dipole und Quadrupole verwendet, so spricht man von der linearen Strahloptik, da die wirkenden Ablenkkraften entweder konstant oder linear sind.

Wird die Multipolentwicklung in Zylinderkoordinaten angegeben, lauten die Gleichungen der Radial- und Tangentialmagnetfeldkomponenten mit dem Referenzbereich  $r_{R0}$  in dem ein "gutes" Feld zu erwarten ist

$$B_r(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{r_{R0}} \right)^{n-1} (-a_n \cos(n\varphi) + b_n \sin(n\varphi)) \quad (14)$$

und

$$B_\varphi(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{r_{R0}} \right)^{n-1} (a_n \sin(n\varphi) + b_n \cos(n\varphi)). \quad (15)$$

Hierbei steht der Summand mit  $n = 1$  für die Dipolkomponente, der Summand mit  $n = 2$  für die Quadrupolkomponente und so weiter. Der Koeffizient  $b_n$  beschreibt die normalen Multipolkomponenten, während  $a_n$  die schiefwinkligen (engl.: skew) Komponenten darstellt. Bei einem schiefwinkligen Quadrupol handelt es sich zum Beispiel um einen im Vergleich zum Kapitel 2.4 um  $45^\circ$  gedrehten Quadrupol, der für eine Kopplung zwischen vertikaler und horizontaler Teilchenbewegung sorgt. Bei einem normalen Quadrupol ist diese Kopplung unerwünscht, jedoch können die Anteile durch Fertigungstoleranzen der Magnete oder Abweichungen im Aufbau entstehen.

## 2.7 Multipolanteile in Magneten

Bei Betrachtung eines idealen Quadrupolmagneten wäre in den Gl. 14 und 15 nur die Magnetfeldkomponente  $b_2 \neq 0$ . Äquivalent gilt dies für andere Multipole und deren Komponenten. Reale Magnete hingegen weisen weitere, höhere Multipolordnungen auf, die in erlaubte und unerlaubte Ordnungen unterteilt werden. Die erlaubten Anteile entstehen beispielsweise durch Abweichungen von der idealen Polschuhform, der endlichen Ausdehnung der Polschuhe, Inhomogenitäten im Eisen und Herstellungs- und Montagetoleranzen.

Zur Bestimmung der erlaubten Multipolkomponenten betrachten wir die Feldbeschreibung des Magnetfeldes durch eine komplexe Funktion

$$F = C_N z^N + \sum_{n \neq N} C_n z^n, \quad (16)$$

wobei  $N$  den Index des erwünschten Magnetfeldanteils und die anschließende Summe das Spektrum der unerwünschten Anteile beschreibt. Bei der komplexen Darstellung werden die schiefwinkligen Komponenten des Magneten durch den Imaginärteil und die normalen Komponenten durch den Realteil veranschaulicht.

Die betrachteten Magnete besitzen bauartbedingt eine gewisse Rotationssymmetrie, die sich über  $\frac{\pi}{N}$  ausdrücken lässt. Ein Quadrupol ( $N = 2$ ) besitzt also eine  $90^\circ$ -Drehinvarianz. Hieraus folgt

$$F_n \left( \Theta + \frac{\pi}{N} \right) = -F_n(\Theta) \quad (17)$$

und mit

$$F_n \left( \Theta + \frac{\pi}{N} \right) = \sum C_n |z|^n \cdot \left[ \cos \left( n\Theta + \frac{n\pi}{N} \right) + i \sin \left( n\Theta + \frac{n\pi}{N} \right) \right] \quad (18)$$

ergeben sich aus Gl. 17 die Bedingungen der Rotation zu

$$\cos \left( n\Theta + \frac{n\pi}{N} \right) + i \sin \left( n\Theta + \frac{n\pi}{N} \right) = -\cos(n\Theta) - i \sin(n\Theta). \quad (19)$$

Für Real- und Imaginärteil getrennt bedeutet dies

$$\cos(n\Theta) \cos\left(\frac{n\pi}{N}\right) - \sin(n\Theta) \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right) = -\cos(n\Theta), \quad (20)$$

$$\sin(n\Theta) \cos\left(\frac{n\pi}{N}\right) - \cos(n\Theta) \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right) = -\sin(n\Theta). \quad (21)$$

Um die Gleichungen 20 und 21 erfüllen zu können müssen die Anforderungen

$$\sin\left(\frac{n\pi}{N}\right) = 0 \implies \frac{n}{N} = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (22)$$

$$\cos\left(\frac{n\pi}{N}\right) = -1 \implies \frac{n}{N} = 1, 3, 5, 7 \dots \quad (23)$$

erfüllt sein. Da Gl. 23 die stricktere Bedingung darstellt, sind alle Multipole für die

$$n_{erlaubt} = N(2m + 1) \quad \text{mit } m \in N \quad (24)$$

gilt erlaubt. Der Quadrupol besitzt somit z.B. die höheren, erlaubten Ordnungen

$$n_{Quadrupol} = 2(2m + 1) = 6, 10, 14, 18 \dots \quad (25)$$

In einem realen Magneten treten allerdings auch unerlaubte Multipolkomponenten auf, die stochastisch verteilt sind.

## 2.8 Diskrete Fourier-Transformation

Die Fourier-Transformation wird angewendet um bei einem zeitkontinuierlichen Signal das Frequenzspektrum zu bestimmen. Bei einer digitalen Datenverarbeitung kommen allerdings zeitdiskrete Signale zum Einsatz, die die Verwendung der diskreten Fourier-Transformation (DFT) voraussetzen. Hierbei sind die Abtastwerte  $x(n)$  des Signals zu bestimmten Zeitpunkten mit dem festen Abstand  $T$  bekannt. Die DFT wird aus der Fourier-Transformation abgeleitet und lautet

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-jkn \frac{2\pi}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (26)$$

wobei  $N$  die Anzahl der Abtastwerte angibt. Die Abtastwerte  $N$  bestimmen auch die Feinheit des diskreten Frequenzrasters  $k$ , das die Frequenzen für die sinusförmige Folge darstellt. Der Abstand der Spektrallinien des Rasters beträgt bei der Abtastfrequenz  $f_s$  und  $N$  Abtastpunkten  $f_{Abstand} = \frac{f_s}{N}$ , wodurch sich die Frequenzen des Rasters mit

$$X[k] = k \frac{f_s}{N} \quad (27)$$

beschreiben lassen. Enthält das Signal Frequenzkomponenten, die sich nicht auf dem Raster befinden, werden sie durch die benachbarten Frequenzen angenähert, was unter dem Namen Leck-Effekt aus Abb. 7 bekannt ist. Liegt die Signalfrequenz hingegen im Raster der Abtastung, ist die periodische Fortsetzung des Originalsignals kontinuierlich (siehe Abb. 7 links) und weist keinen Sprung auf. Sowohl die Zeitfolge als auch das Spektrum sind bei der DFT periodisch.

Die Analysegleichung 26 der DFT lässt sich über die Euler'sche Formel umschreiben zu

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(kn \frac{2\pi}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) (-1) \sin\left(kn \frac{2\pi}{N}\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (28)$$

Der Realteil des Koeffizienten  $X[k]$  beschreibt die Stärke der Cosinusschwingungen mit der Frequenz  $k$  bei einer Signallänge von  $N$ . Der Imaginärteil gibt hingegen die Stärke der negativen Sinusschwingungen an.

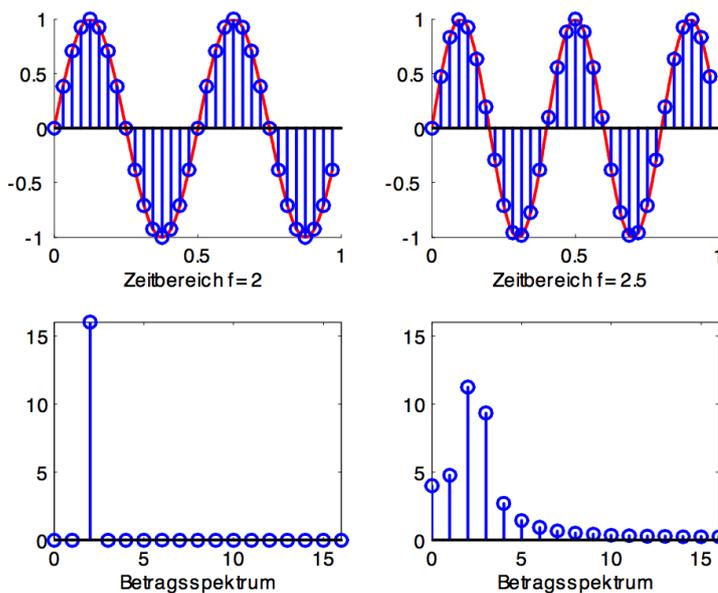


Abb. 7: Die rechte Bildseite zeigt den Leck-Effekt, der auftritt wenn das Beobachtungsintervall nicht mit dem ganzzahligen Vielfachen der Periodenlänge übereinstimmt und Phasensprünge bei der periodischen Fortsetzung des Signals entstehen. Links ein kontinuierlich fortsetzbares Signal bei dem kein Leck-Effekt auftritt. Signal- und Rasterfrequenz stimmen überein.

## 2.9 Elektromagnetische Induktion

Die elektromagnetische Induktion wird durch das Faraday'sche Induktionsgesetz

$$U_{ind} = \oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\dot{\Phi} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (29)$$

beschrieben, wobei  $\Phi$  den magnetischen Fluss und  $\vec{E}$  das elektrische Feld darstellt.

Dreht sich eine Leiterschleife mit der Fläche  $A$  und  $N$  Windungen in einem zeitlich konstanten magnetischen Feld  $B$ , ändert sich im Bezugssystem der Leiterschleife der magnetische Fluss  $\Phi$ . Die resultierende Spannungsinduktion  $U_{ind}$  ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi f$ .

$$U_{ind}(t) = -NBA\omega \cos(\omega t + \phi). \quad (30)$$

## 2.10 Messung mit einer rotierenden Spule

Zur Vermessung eines Quadrupolmagneten kann nicht nur eine Hall-Sonde, sondern auch eine rotierende Spule (siehe Abb. 8) verwendet werden. Diese kommt im FP zum Einsatz, um die in Abschn. 2.7 beschriebenen Multipolanteile des Magneten zu bestimmen.

Die Messung mit der Spule erfolgt auf der xz-Ebene des in Abschnitt 2.2 beschriebenen Koordinatensystems. (Welche Position der Spule auf der genannten Ebene ist sinnvoll und welche nicht?) Es ist darauf zu achten, dass die Messsonde orthogonal zu den Endplatten des Quadrupols ausgerichtet wird. Des Weiteren darf die Messspule an der Spitze der Messsonde auf keinen Fall einer mechanischen Belastung ausgesetzt werden! Kommt es zu einer Verformung oder einer Verschiebung der Messspule in der Klemme, kann dies ungewollte Multipolanteile bzw. ein erhöhtes Untergrundrauschen nach sich ziehen.

Die Auswertung des Messsignals erfolgt über ein Oszilloskop, das äquidistant  $N = 2500$  Messpunkte aufnimmt. Um zu überprüfen ob ihre Messwerte ein brauchbares Ergebnis liefern, erstellen Sie mit Mathematica oder einem ähnlichen Programm eine Datei mit der Sie die aufgenommenen Messdaten (mit Excel in .txt konvertierbar) auswerten und durch ein Balkendiagramm graphisch darstellen können. Die Höhe der Multipolkomponenten  $k$  soll dabei auf den dominierenden Anteil normiert werden.

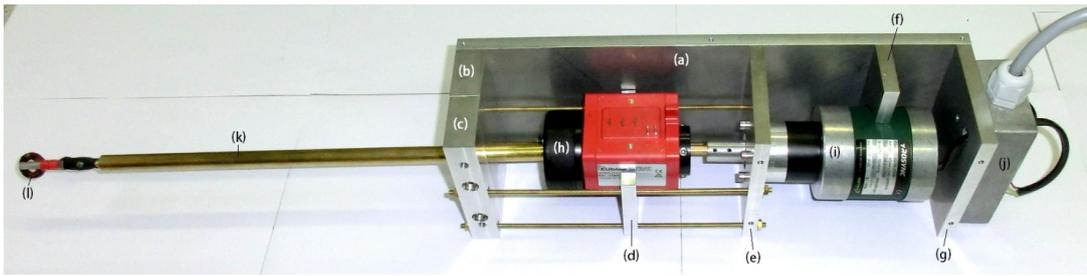


Abb. 8: Der Eigenbau einer rotierenden Spule mit montierter Messspule: (a) Grundplatte, (b)+(c) Halterung Führungsrohr, (d) Halterung Schleifring, (e) Frontplatte Motor, (f) Halterung Motor, (g) Endplatte, (h) Schleifring, (i) Elektromotor, (j) Drehstromanschluss und (l) Messspule.

### 3 Aufgaben

Bitte bringen Sie einen USB-Stick mit.

Bitte beachten: Das Koordinatensystem der CNC-Flachbetteinheit ist nicht identisch mit dem in der Anleitung vorgestelltem Koordinatensystem der Teilchendynamik. In den Aufgabenstellungen wird sich bereits auf das Koordinatensystem der CNC-Flachbetteinheit bezogen.

Die Hall-Sonde misst die magnetische Flussdichte gleichzeitig auf 3 Achsen. Die gemessenen magnetischen Flussdichten werden als  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  bezeichnet, ihre Ausrichtung unterscheidet sich jedoch vom Koordinatensystem der CNC-Einheit (s. Abb. 9). Im Folgenden werden die Komponenten des Feldes so angegeben, wie sie in der Datei ausgegeben werden.

Die Bezeichnungen der Feldkomponenten sollte in der Ausarbeitung an das Achsensystem der CNC-Einheit angepasst werden!

Ist-Zustand  
für CNC-Fräsesystem (schwarz)  
und Hall-Sonden-System (rot)

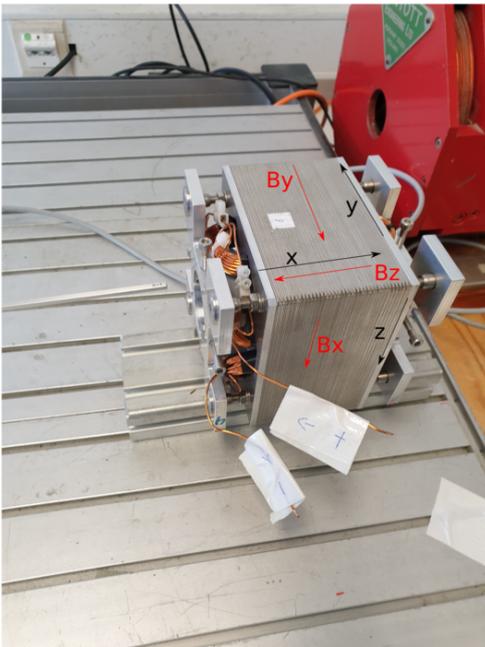


Abb. 9: Koordinatensystem der CNC-Einheit (schwarz) und der 3D-Hallsonde (rot).

---

## 3.1 Messungen

---

### Aufgabe M1

Machen Sie sich mit dem Messaufbau vertraut und treffen Sie alle Vorbereitungen für die erste Messung. Beachten Sie dabei die korrekte Ausrichtung der zu messenden Magnete. Überlegen Sie sich geeignete Raster mit angemessenen Schrittweiten für das Abfahren der Messebenen. Das Abfahren des Gitters sollte nicht länger als 15 min dauern. Rechnen Sie damit, dass der Aufbau ca. 3 s benötigt, um einen einzelnen Gitterpunkt anzufahren und zu messen.

### Aufgabe M2

- a) Messen Sie die Breite des Steerer-Spaltes und schätzen Sie die Wicklungszahl durch händisches Zählen ab.
- b) Vermessen Sie das Magnetfeld des Steerers in der x-y-Ebene an einer geeigneten Position auf der z-Achse bei einem Spulenstrom von 2 A.

### Aufgabe M3

- a) Vermessen Sie das Gradientenprofil des Quadrupols auf einer x-y-Ebene bei einem Spulenstrom von 0 A.
- b) Vermessen Sie das Gradientenprofil des Quadrupols auf der selben Ebene bei drei weiteren Spulenströmen in gleichmäßigem Abstand, z.B. in 1 A-Schritten bis 3 A.
- c) Vermessen sie bei 3 A jeweils eine weitere x-y-Ebene für zwei weitere Positionen auf der z-Achse. Diese sollten beide zwischen den beiden oberen oder zwischen den beiden unteren Polschuhen liegen. Achten Sie darauf, die Ebenen so zu wählen, dass die Sonde während der Messungen die Polschuhe nicht berührt.
- d) Wählen sie eine Position auf der x-Achse, die auf der im Aufgabenteil b) vermessenen Ebene liegt. Messen sie an dieser Position den Gradienten entlang der y-Achse bei mindestens 2 weitere Stromstärken, wobei die gleiche Schrittweite wie in Aufgabenteil b) gewählt werden sollte (z.B. 1 A-Schritte, also bei 4 A und 5 A).

### Aufgabe M4

Nehmen Sie mit der rotierenden Spule das Magnetfeld des Quadrupols für die von Ihnen in M3 gewählten Spulenströme an einer festen Position im Inneren des Magneten auf. Ist es sinnvoll, das Remanenzfeld des Quadrupols mit der rotierenden Spule ebenfalls zu vermessen?

---

## 3.2 Auswertung

---

### Aufgabe A1

- a) Fertigen Sie jeweils einen Konturplot für  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  des Steuerers an und diskutieren Sie diese. Was beobachten Sie für die magnetische Flussdichte auf den parallel zur Messebene liegenden Achsen? Entspricht dies Ihren Erwartungen?
- b) Betrachten Sie den Konturplot für  $B_x$ . Überlegen Sie sich, welche Abweichung der magnetischen Flussdichte vom Mittelwert Sie noch als akzeptabel erachten und begründen Sie ihre Abschätzung. Bestimmen Sie daraus dann die Größe und die mittlere magnetische Flussdichte des feldglatten Bereiches.
- c) Berechnen Sie die Anzahl der Windungen des Paltinensteuerers und vergleichen Sie diese mit Ihrer Zählung aus **M2 a)**. Wie unterscheidet sich die Wicklungszahl, wenn Sie statt der mittleren Flussdichte des feldglatten Bereichs die mittlere Flussdichte des gesamten Messbereichs verwenden?

### Aufgabe A2

- a) Zeichnen Sie das in **M3 a)** gemessene Remanenzgradientenprofil für  $B_x$ . Welchen Einfluss hat dies auf die weiteren Gradientenprofile? Stellen Sie dabei jeweils einen Fit aus dem homogenen Bereich und einen aus dem Randfeld dar und gehen Sie auf diese ein.
- b) Ermitteln Sie mithilfe Ihrer Messungen für  $B_x$  aus **M3 b)** die Gradientenprofile für die verschiedenen Spulenströme und vergleichen Sie diese.
- c) Bestimmen Sie die magnetische Länge des Quadrupols und vergleichen Sie diese mit der realen Länge. Entspricht das Ergebnis Ihren Erwartungen?
- d) Führen Sie mit den Daten aus **M3 b)** und **d)** eine Strom-Gradienten-Kalibrierung für  $B_x$  durch. Welchen Zweck hat eine solche Kalibrierung, und wie könnte das Ergebnis verbessert werden?
- e) Fertigen Sie aus Ihren in **M3 b)** und **c)** aufgenommenen Messdaten jeweils einen Konturplot für  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_z$  auf den verschiedenen Ebenen des Quadrupols an und diskutieren Sie diese. Was beobachten Sie für die magnetische Flussdichte auf den verschiedenen Achsen? Welche Unterschiede zwischen den verschiedenen Ebenen können Sie beobachten? Entspricht dies Ihren Erwartungen?

### Aufgabe A3

- a) Führen Sie mit den in **M4** durchgeführten Messungen eine Spannungs-Gradienten-Kalibrierung für die rotierende Spule durch. Weshalb ist dies sinnvoll, und wie könnte das Ergebnis verbessert werden?
- c) Bestimmen Sie aus den Messungen in **M4** die Rotationsfrequenz der rotierenden Spule und die Multipolkomponenten des Quadrupols. Stimmt die Frequenz mit dem angegebenen Wert überein? Welche Anteile sehen Sie in den von Ihnen angefertigten Frequenz-Spektren? Treten auch starke Anteile unerlaubter Multipolkomponenten auf? Wenn ja, wie lassen sich diese erklären und welche Maßnahmen könnten dagegen ergriffen werden? Welche Unterschiede sehen Sie für die verschiedenen Spulenströme?

T. Weilbach, Mai 2009  
überarbeitet von M. Gros und M. Arnold, April 2014  
überarbeitet von R. Grewe, April 2018  
überarbeitet von M. Herbert, April 2021

---

## Anhang

---

### Bedienung des Rechners

---

Auf dem Rechner vom F-Praktikums Versuch *Magnetfeldmessung* ist Linux installiert mit der grafischen Oberfläche (GUI) *Cinnamon*. Nach erfolgter Anmeldung als Benutzer *fp* wird ein *Terminal* (auch *Kommandozeile*, *BASH*, *Shell*) geöffnet. Das aktuelle Verzeichnis des Terminals ist */home/fp/Daten*. Das Programm *hallControl3D* zur Steuerung der CNC Fräse legt aufgenommene Magnetfelddaten in den Ordner, in dem es gestartet wurde. Starten des Programms *hallControl3D* durch Eingabe von *./hallControl3D* im Terminal:

```
~/Daten $: ./hallControl3D
```

Das Programm zeigt als Ausgabe

```
#####  
#                                     #  
#           HALL CONTROL             #  
#                                     #  
#####  
# startpoint for measurement: (0 0 0)  
# endpoint for measurement: (0 0 0)  
#####  
# current Position is unknown  
#####  
# last measured B-Field value: 0  
#####  
cmd>
```

und erlaubt Eingaben in eine Kommandozeile, die durch *cmd>* gekennzeichnet ist. Bei der Eingabe von Befehlen ist wichtig, darauf zu warten, dass das Programm Befehlseingaben annimmt (durch *cmd>* gekennzeichnet).

---

In die Kommandozeile von *hallControl3D* lassen sich Befehle eingeben, Beispielsweise *help* für eine Übersicht aller Befehle.

```
cmd> help
```

```
#####  
#  
#          LIST OF COMMANDS          #  
#  
#####  
# cal          - calibrate          - drives to the lower limit of each axis and stores  
#                                     the origin  
#                                     (necessary for definition of absolut positions)  
#---  
# mr x y z     - move relative - moves x, y, z steps relative to current position  
#                                     example: mr 1000 2000 -3000  
#---  
# ma x y z     - move absolute - moves to absolute position (x y z). Only possible  
#                                     after calibration  
#                                     example: ma 1200 2400 -3600  
#---  
# numpad       - switches to "numpad mode". In numpad mode the probe can be moved  
#                                     using the numpad buttons. Explanations will be shown after  
#                                     switching. It is also possible to manually measure the B-field  
#                                     in this mode.  
#---  
# startpoint   - defines current probe position as startpoint of a x-y-B-field  
#                                     measurement.  
#---  
# endpoint     - defines current probe position as endpoint of a x-y-B-field  
#                                     measurement.  
#---  
# measure      - measures a grid from "startpoint" to "endpoint" in die x-y-plane.  
#               The amount of measurepoints per axis have to be entered after  
#               calling.  
#---  
# exit         - exit this script  
#===  
<press any key>
```

Als sehr nützlich erweist sich der *numpad*-Modus. Wichtig ist, dass die Tasten nicht gedrückt gehalten werden, da die Schrittmotoreinheit ansonsten einen unkontrolliert langen Weg fährt. Im *numpad*-Modus ist berücksichtigt, dass die negative *z*-Achse nach oben zeigt.

```
cmd> numpad
```

```
#####  
#                                     #  
#   NumberPad-controlled Mode       #  
#                                     #  
#####  
# positions for any magnet:  
# startpoint for measurement: (0 0 0)  
# endpoint for measurement:   (0 0 0)  
#####  
# current Position: (0 0 0)  
  
#####  
  
use one of the following keys:  
7 | +X | move $stepSize steps forward  
1 | -X | move $stepSize steps backwards  
  
8 | +Y | move $stepSize steps to the right  
2 | -Y | move $stepSize steps to the left  
"  
9 | -Z | move $stepSize steps up  
3 | +Z | move $stepSize steps down  
"  
  
+ | increase the step size by a factor of 10  
- | decrease the step size by a factor of 10  
  
5 | measure B-field at current position and  
   save position and field strength in  
   "manualMeasurement_<timestamp>.txt"  
  
s | define current position as startpoint for measurement  
e | define current position as endpoint for measurement  
m | start measurement  
  
b | go back to main menu  
  
current step size: 100 steps = 1000 um  
  
current Position in steps: (0, 0, 0)  
current Position in um: (0, 0, 0)  
last measured field value: 0.0
```

---

## Bedienung der CNC-Einheit

---

Falls die CNC-Einheit Stromlos geschaltet wird, muss bei Wiedereinschalten das Programm *hallControl* neu gestartet werden. Dies erfordert auch eine neue Kalibrierung der Position. Bei Kalibrierung darauf achten, dass alle Achsen einige hundert Schritte vom Ursprung entfernt sind ( $+x$ ,  $+y$ ,  $-z$ ).