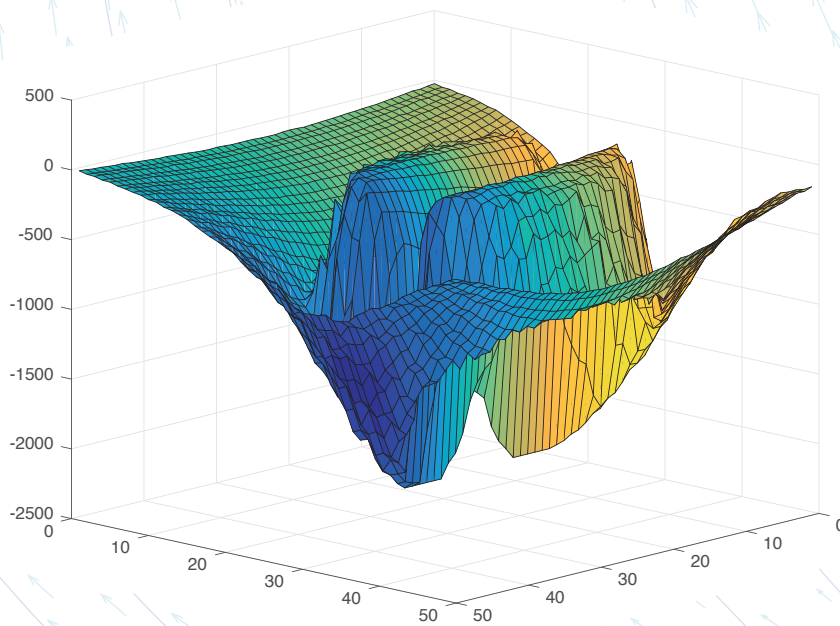


**Projekt für Jugend forscht 2017
Berlin**

Fachgebiet Physik

MAG 3D

**Mag3D – Magnetfelder als Vektorfeld messen und visualisieren
Version 2.0**



**Finja Schneider (13.10.2001), Klasse 10
Franz-Haniel-Gymnasium Duisburg-Homberg**

**Myrijam Stötzner (24.2.2001), Klasse 10
Primo-Levi-Gymnasium Berlin-Weißensee**

Kurzfassung

Die magnetische Flussdichte zeigt Richtung und Stärke eines Magnetfeldes an – mathematisch handelt es sich um einen 3D-Vektor am Punkt der Messung. Experimente im Schulunterricht verzichten üblicherweise auf die Vektordarstellung, da es keine entsprechenden Messgeräte für den Physikunterricht gibt.

Unsere Entwicklung ermöglicht die Messung und Visualisierung von Magnetfeldern als 6D-Vektorfeld – mit einem 3D-Vektor für die Flussdichte B und einer dazugehörigen 3D-Koordinate. Der gesamte Messaufbau wurde grundlegend überarbeitet und weiterentwickelt und ermöglicht nun die 3dimensionale Positionierung des Sensors mit einer parallelen Kinematik.

Die Steuerung erfolgt über eine selbstprogrammierte Smartphone-App und die Daten lassen sich in verschiedenen Formaten weiterverarbeiten und visualisieren. Ergänzend zur Weiterentwicklung unseres Projektes vergleichen wir unsere Entwicklung auch mit einem kommerziellen Mess-System vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS.

Fragestellung

Die inhaltliche Fragestellung unseres Projektes lautet:

Wie lässt sich ein magnetisches Feld messtechnisch räumlich erfassen und visualisieren (3D-Vektorfeld für Ebenen und Körper)?

Wie können Messfehler minimiert werden und eine ausgewogene Darstellung erreicht werden, ohne dass die Charakteristika des gemessenen Vektorfeldes ebenfalls reduziert werden?

Neben der inhaltlichen Fragestellung beschäftigt sich unser Projekt auch mit der Entwicklung eines Prototypen für den Einsatz in Schulen, so dass für den Physikunterricht ein preiswertes und zuverlässiges Messgerät für Magnetfelder in Form von Vektorfeldern zur Verfügung steht.

Methode

Wir setzen einen handelsüblichen 3D-Magnetfeldsensor ein, der für viele Robotikprojekte genutzt wird und die magnetische Flussdichte in den drei Raumrichtungen mit hoher Genauigkeit misst. Diesen Sensor bewegen wir mit einer X/Y-Vorrichtung und mit einer neu entwickelten Delta-Konstruktion über dem Untersuchungsobjekt. Der Delta-Ansatz nutzt eine spannende, parallele Kinematik und kann zusätzlich noch Ebenenschnitte liefern, so dass topographische Magnetfeldaufnahmen möglich sind. Das Untersuchungsobjekt wird anhand eines Rasters vermessen und zu jedem dieser Punkte werden die drei Raumkomponenten der magnetischen Flussdichte gemessen – es entsteht ein 5D bzw. 6D Vektorfeld.

Anhand von mathematischen Optimierungen können wir sowohl ein Rauschen des Sensors minimieren als auch das magnetische Feld zwischen den Messpunkten zuverlässig schätzen.

Ergebnisse – Diskussion

Unsere Konstruktion ermöglicht eine automatisierte und zuverlässige Erfassung des Vektorfeldes der magnetischen Flussdichte und eine Übertragung der Daten auf einen Computer zur Visualisierung. Diese Konstruktion kann das Magnetfeld erfassen, ohne es zu verändern.

Da wir unsere Konstruktion mit Hilfe einer selbst programmierten App über ein Smartphone steuern, ist die Konstruktion einfach zu bedienen.

Als Weiterentwicklung wäre eine Migration des Gesamtsystems von Steuerung und Auswertung auf den Raspberry Pi möglich – z.B. falls Schulen die vorinstallierte Software Wolfram Alpha nutzen möchten oder eigene Visualisierungen programmieren möchten.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Fragestellung	1
Marktrecherche – Systeme und Sensoren zur Magnetfeldmessung.....	1
Zielsetzung	2
Rückblende.....	3
Physikale Grundlagen – Begriffsklärungen	4
Magnetische Flussdichte (magnetische Induktion)	4
Lorentzkraft	4
Magnetfelder	5
Magnetsensitive Widerstände	5
Vektoren	5
Vektorfeld	6
(Neu)Entwicklung des Mag3D-Magnetfeldscanners	6
Designwechsel: vom X/Y-Plotter zum Delta-Design – Mathematische Grundlagen	6
Neuprogrammierung des Mikrocontrollers – Parallele Kinematik	9
Neubau der Elektronik	10
Exkurs: Einladung zum Fraunhofer-Institut IIS Erlangen	11
Mathematische Optimierungen	11
<i>Messgenauigkeit: Messreihen, Mittelwert, Streuung</i>	<i>11</i>
<i>Interpolation – schneller oder genauer messen</i>	<i>12</i>
Fazit.....	15
Abbildungen	
Literatur	
Unterstützung	

Einleitung

In Berlin, Brandenburg und in NRW werden bei Bauarbeiten oft Bomben aus dem 2. Weltkrieg gefunden und müssen dann entschärft werden. Diese Blindgänger sind oft sehr verrostet und werden über Luftbildauswertungen gesucht. Wir haben uns daher gefragt, ob man nicht auch über Anomalien im Magnetfeld der Erde diese Bomben finden könnte, denn der Eisenmantel müsste das Magnetfeld verzerren.

Von diesem Ansatz ausgehend hatten wir ein Messgerät entwickelt, das Magnetfelder dreidimensional als Vektorfeld vermessen kann. Dieses Messgerät haben wir für den aktuellen Jugend-forscht-Wettbewerb deutlich weiterentwickelt:

- Es sind nun Schichtaufnahmen möglich, d.h. wir erfassen ein 6-dimensionales Vektorfeld (3D Position, 3D Flussdichte B)
- Eine Interpolationsfunktion ermöglicht eine präzise Abschätzung des Magnetfeldes zwischen den Messpunkten
- Erhöhte Messgenauigkeit und Entfernen von Rauschen (Glättung, ohne Charakteristika des Vektorfeldes unscharf werden zu lassen).

Fragestellung

Die übergeordnete Fragestellung lautet: Wie lässt sich ein magnetisches Feld messtechnisch räumlich erfassen und visualisieren?

Dazu möchten wir ein für Schulen einfach anzuwendendes Messgerät für den Physikunterricht entwickeln, dessen anschauliche Visualisierung über die Darstellung des Magnetfeldes mithilfe von Eisenfeilspänen hinausgeht, da hier immer nur zweidimensionale Abbildungen in der horizontalen Ebene dargestellt werden.

Weiterhin soll unsere Entwicklung eine quantitative, messtechnische Auswertung der Magnetfelder in 3D ermöglichen. Die konkrete Forschungsfrage lautet daher:

Wie lässt sich das Magnetfeld dreidimensional für jeden Punkt in einem dreidimensionalen Messbereich quantitativ ermitteln und visualisieren (3D-Vektorfeld für Ebenen und Körper)?

Wenn wir Ebenen vermessen, nimmt mit einer Verdopplung der räumlichen Auflösung in X- und Y-Achse die zu messende Datenmenge um das doppelte zu – und damit auch die Zeit, bis die Messung abgeschlossen ist, d.h. für Ebenen nimmt die Datenmenge im Quadrat zu; bei mehreren Ebenen im Kubik. Ferner ist jede Messung immer mit einer Ungenauigkeit verbunden, so dass sich folgende Anschlussfragen ergeben:

Inwiefern können geeignete mathematische Verfahren gefunden werden, die dargestellte Visualisierung von Magnetfeldern in ihrer Auflösung zu erhöhen, ohne die Mess-Auflösung zu verändern (Abschätzen von Werten)?

Und schließlich: Wie können Messfehler minimiert werden und wie kann eine ausgewogenere Darstellung erreicht werden, ohne dass die Charakteristika des gemessenen Vektorfeldes ebenfalls reduziert werden?

Marktrecherche – Systeme und Sensoren zur Magnetfeldmessung

In Industrie und Forschung gibt es Messsysteme, die Stärke und Struktur von Magnetfeldern auf unterschiedlichen Größenordnungen messen können. Zu industriellen Anwendungen zählen beispielsweise Produkttests und Qualitätskontrollen in der Produktion von Hochleistungsmagneten, Magneten für Anwendungen im Bereich der Sensorik, der Akustik oder für Aktoren. Untersucht werden zum Beispiel die Homogenität des Magnetfeldes, die räumliche Ausrichtung oder die Ab-

weichungen zwischen einem theoretischen Modell des Magnetes und dem tatsächlich hergestellten Magneten.

So erreicht das Produkt „MiniCube3D“ der Firma Mag-Cam beispielsweise eine Auflösung von 128x128 Messpunkten bei einem Punktabstand von 100µm. Die Sensorfläche beträgt 12,7mm x12,7mm. Auch hier werden die Richtungen und Stärken des Magnetfeldes in allen drei Raumrichtungen gemessen. Der Vorteil dieser Lösung liegt darin, dass durch das Matrix-Design des Sensors und die Integration in einem einzigen Bauteil keine beweglichen Teile benötigt werden. Bei einem Preis von 48.000€ für eine Messstation bzw. alternativ 1.000-2.500€ für eine Einzelmessung kommt dieses System für Schulen und Privatanutzer nicht infrage.

Für Experimente im Schulunterricht gibt es Magnetfeldsensoren, die die Stärke des Magnetfeldes messen (Vernier, Pasco, Mekruphy) und vereinzelt auch zwei Ebenen ermöglichen (Pasco). Damit lassen sich z.B. Magnetfelder in Spulen messen, die Abhängigkeit der magnetischen Flusssdichte von Entfernung, Windungszahl oder Stromfluss (vgl. Tewes 2016 für eine Vielzahl entsprechender Versuche).

Der Magnetfeldsensor von Vernier kostet ca. 200€ und kann z.B. mit dem TI Nspire CX Taschenrechner ausgewertet werden. Er kann jedoch nur in eine Richtung das magnetische Feld messen, also nur punktuell. Zudem ist er nicht automatisiert, sodass man ihn per Hand bewegen muss. Ein für Frühjahr 2017 angekündigter Magnetfeldsensor wird alle drei räumlichen Komponenten der magnetischen Flusssdichte messen können.

Die automatisierte dreidimensionale Vermessung von Magnetfeldern ist daher dem Einsatz in Industrie und Forschung vorbehalten – ein Einsatz für Experimente im Schulunterricht ist durch die hohen Anschaffungskosten nicht möglich. Eine Alternative zu kommerziellen Sensoren ist der Einsatz von Smartphones (Kimbrough, Strus et al. 2014), da diese etliche Sensoren, die für den naturwissenschaftlichen Einsatz interessant sind, bereits mitbringen (Beschleunigung, Magnetfeld, Mikrofon, GPS, Lichtsensor). Aber auch dabei muss der Sensor bzw. das Smartphone per Hand an die zu messende Stelle bewegt werden. Eine automatisierte Messung mit reproduzierbaren Messwerten in Abhängigkeit von der räumlichen Position zur Magnetquelle ist schwer realisierbar.

Aufgrund dieser Überlegungen haben wir uns entschieden, unsere Projektidee weiter zu verfolgen, obwohl kommerzielle Alternativen in hoher Qualität zur Verfügung stehen – *eben nur nicht für den Einsatz in Schulen*. Unser Ansatz verbindet eine hohe Messgenauigkeit mit einem automatischen Positionssystem und kann ein 5- bzw. 6D-Vektorfeld – die drei Raumkomponenten des Magnetfeldes sowie drei Koordinaten für den jeweiligen Messpunkt – vermessen.

Für diesen Ansatz haben wir zwei Modelle gebaut, mit denen die Messungen nach unterschiedlichen Anforderungen erfolgen.

Zielsetzung

Unsere Zielsetzung ist es, eine Konstruktion zu entwickeln, die zuerst das Magnetfeld einer vorgegebenen Fläche und im Anschluss das eines vorgegebenen Raumes vermessen kann (5D- bzw. 6D-Feld).

Für die räumliche Vermessung werden mehrere Ebenen nacheinander vermessen, so dass die gesamte Messung einer Punktwolke in einem Quader entspricht – jeder Punkt repräsentiert den entsprechenden Messpunkt. Zu jedem dieser Messpunkte wird die Richtung des Magnetischen Feldes, genauer der Magnetischen Flusssdichte B ermittelt und die jeweiligen Komponentenanteile des Vektors gespeichert.

Mit einer selbst entwickelten App auf dem Smartphone wird unser Magnetfeldscanner bedient und speichert die Messwerte für die anschließende Auswertung auf einer SD-Karte.

Rückblende

Bei den ersten Recherchen für unseren Magnetfeldscanner sind wir auf den hochintegrierten Sensor HMC5883L der Firma Honeywell gestoßen, der in vielen Robotik-Anwendungen als 3D-Kompass eingesetzt wird, um Robotern über das Magnetfeld der Erde eine zusätzliche Orientierung im Raum zu geben.

Der Sensor misst die *magnetische Flussdichte* in den drei Raumrichtungen ($B_x|B_y|B_z$), also die Dichte des magnetischen Feldes. Ihre Einheit ist nach dem Physiker und Elektroingenieur Nikola Tesla (1856-1943) benannt und gibt die Kraftwirkung auf bewegte Ladungen in diesem Feld an.

In einem ersten Schritt haben wir den Magnetfeldsensor per Hand über ein Koordinatensystem verschoben. Wir wollten messen, wie sich ein Gegenstand aus Stahl auf das Magnetfeld der Erde auswirkt und inwiefern wir diese Veränderungen messen und visualisieren können. Dazu haben wir auf ein Blatt Papier ein 3x5-Feld gezeichnet, wobei jedes Kästchen einem cm^2 entsprach. Dann haben wir die Fläche Kästchen für Kästchen mit dem Magnetfeldsensor, der an einem Arduino-Mikrocontrollerboard angeschlossen war, abgetastet. Ein kleines Programm auf dem Mikrocontroller, das wir selbst geschrieben haben, hat die Messergebnisse des Sensors eingelesen und auf dem seriellen Monitor (einer Anwendung auf dem Computer zur Kommunikation mit dem Controller) ausgegeben. So konnten wir das Magnetfeld zeilen- und spaltenweise vermessen und die Werte speichern. Um die Auswirkungen des Eisenstücks (Stichsägeblatt) auf das Magnetfeld der Erde messen zu können, haben wir diesen Versuch zweimal durchgeführt: einmal ohne jeglichen Gegenstand und einmal mit dem eisernen Gegenstand unter dem Koordinatensystem (in 10cm Entfernung). Beide Messreihen haben wir dann in MATLAB ausgewertet, indem wir die gespeicherten Werte in entsprechende Variablenarrays kopiert haben (Arrays entsprechen im Prinzip Tabellen als Variablenbezeichnung) und diese direkt visualisieren konnten.

Dass schon ein kleines Sägeblatt das Erdmagnetfeld deutlich verzerren konnte, hat gezeigt, dass unsere Grundidee funktionieren könnte. Daraufhin wollten wir eine Konstruktion bauen, die den Sensor automatisiert über eine Fläche bewegt, um genauere Messergebnisse zu bekommen.

Unsere erste Konstruktion hat den Sensor mithilfe eines Schlittens über die zu messende Fläche bewegt. Dabei war wichtig, dass keine metallischen Gegenstände den Messvorgang beeinflussen. Hinzu kommt, dass unsere Konstruktion möglichst leicht und preiswert nachbaubar sein sollte. Deswegen haben wir uns für einen Antrieb durch Schrittmotoren entschieden. Diese sollten sich allerdings nicht mit dem Sensor mitbewegen, damit die Messergebnisse nicht beeinflusst werden. Wir haben probiert, das durch eine parallele Kinematik umzusetzen.

Für diese Konstruktion haben wir sehr viele Bauteile entworfen und mit dem 3D-Drucker ausgedruckt, um auch hier die Beeinflussung der Messergebnisse z.B. durch Eisenteile, Schrauben etc. zu vermeiden. Die Schrittmotoren sollten durch einen Seilzug den Schlitten bewegen, unter dem der Sensor befestigt war. Dabei traten einige Probleme auf, da die Schrittmotoren die x-Achse nicht auf beiden Seiten gleichmäßig ziehen konnten – wir konnten keinen entsprechenden Zahnriemen finden und mussten auf Seilzüge ausweichen, die leider trotz vieler Tests zu unzuverlässig waren.

Deswegen sind wir übergangsweise auf eine Fischertechnik-Konstruktion umgestiegen. Diese war ursprünglich ein X/Y-Zeichenplotter, welchen wir umgebaut haben, um ihn als Grundgerüst für einen Magnetfeldscanner nutzen zu können. Dabei haben wir die Zeichenspitze entfernt und unseren Sensor an der Halterung befestigt. Dann haben wir die eingebauten Schrittmotoren mit unserem Arduino verkabelt und die Metallstangen im Schneckenvortrieb durch Kohlefaserstäbe ersetzt.



Abbildung 1: Magnetfeldscanner mit fischertechnik X/Y-Plotter

Diese Konstruktion hatte den Vorteil, dass sowohl die X- als auch die Y-Achsen nicht ungleichmäßig verschoben werden konnten und wir dadurch zuverlässige und reproduzierbare Messergebnisse bekamen, mit denen wir weiterarbeiten konnten.

Physikale Grundlagen – Begriffsklärungen

In diesem Kapitel definieren und erklären wir die Begriffe, die im weiteren Verlauf unseres Projektes verwendet werden. Für manche können wir keine mathematisch oder physikalisch „korrekte“ Definition anbieten und greifen daher auf einen Vergleich zurück (z.B. Vektorfeld).

Magnetische Flussdichte (magnetische Induktion)

Bei der magnetischen Flussdichte B handelt es sich um die Flächendichte des magnetischen Flusses. Die magnetische Flussdichte, auch als magnetische Induktion bezeichnet, ist eine physikalische, vektorielle Größe. Die Feldlinien eines Magnetfeldes (als eine Modellvorstellung von Magnetfeldern) zeigen die Richtung der Kraftwirkung auf den Nordpol eines Magneten. Die Dichte der Feldlinien ist ein Maß für die Stärke des Feldes.

Die magnetische Flussdichte kann mathematisch über ein Vektorfeld repräsentiert werden, das die Erfassung der kontinuierlichen Ausrichtung im Raum messtechnisch ermöglicht. Die einzelnen Vektoren geben dabei die lokale Ausrichtung des Magnetfeldes wieder; der Ortsbezug der Messung erfolgt in unserer Entwicklung momentan noch zweidimensional, ist aber bereits für räumliche Koordinaten ausgelegt. Die Komponenten des Richtungsvektors der magnetischen Flussdichte ($B_x|B_y|B_z$) können in den jeweiligen Ebenendarstellungen visualisiert werden.

Lorentzkraft

Die Lorentzkraft wirkt auf einzelne bewegte Ladungsträger in einem Magnetfeld und gehört zum Themengebiet Elektromagnetismus. Bei negativ geladenen Teilchen kann man die Linke-Hand-Regel und bei positiv geladenen Teilchen die Rechte-Hand-Regel anwenden (Daumen = Bewegungsrichtung der Ladungsträger (Ursache); Zeigefinger = Richtung der Magnetfeldlinien (Vermittlung); Mittelfinger = Richtung der Lorentzkraft (Wirkung)).

Die Lorentzkraft wirkt auf eine bewegte Ladung in einem Magnetfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladung und senkrecht zu den Magnetfeldlinien. Sie ändert nur die Richtung, nicht die Geschwindigkeit der Ladungsträger.

Magnetfelder

Ein magnetisches Feld ist ein Kraftfeld, das bewegte Ladungen beeinflussen kann. Man bezeichnet diese Kraft als „Lorentzkraft“. Ruhende Ladungen werden von Magnetfeldern nicht beeinflusst. Die Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes zeigen in die gleiche Richtung und haben die gleichen Abstände voneinander. Fließt Strom durch einen Leiter, dann bildet sich um den Leiter ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld kann durch Feldlinien dargestellt werden, wobei sie lediglich ein Modell des Magnetfeldes darstellen. Die Richtung der Feldlinie in einem Punkt gibt die Richtung der Kraft an, die ein Nordpol eines Magneten erfahren würde, wenn man ihn an diesen Punkt bringen würde. Magnetische Feldlinien gehen also vom Nordpol aus und laufen zum Südpol.

Verschiedene Materialien beeinflussen das magnetische Feld unterschiedlich gut oder schlecht. Sichtbar wird dies durch den Verlauf der Feldlinien des Magnetfeldes. Befindet sich zwischen einem Nord- und einem Südpol nur Luft, dann verlaufen die Feldlinien geradlinig zwischen den Polen. Befindet sich nun zwischen den Polen ein Körper, beispielsweise Holz, welches den magnetischen Fluss genauso beeinflusst wie Luft, dann verlaufen die Feldlinien weiterhin geradlinig. Besteht der Körper jedoch aus einem Material, das den magnetischen Fluss deutlich stärker beeinflusst, z.B. Eisen, dann wird das Magnetfeld (visualisiert über Magnetfeldlinien) so verzerrt, dass es möglichst im Eisen verläuft.

Magnetsensitive Widerstände

Der von uns eingesetzte Sensor ermittelt die magnetische Flussdichte anhand von drei zueinander rechtwinklig angeordneten magnetempfindlichen Widerständen (Magnetic Dependent Resistor, MDR). Da der Widerstandwert generell mit der Leitungslänge (zurückzulegendem Weg) zunimmt, kann man diesen Effekt in Verbindung mit der Lorentzkraft nutzen, um die magnetische Flussdichte zu ermitteln: Die sich bewegendes Ladungsträger werden durch das Magnetfeld abgelenkt und legen so einen längeren Weg zurück. Indem quer zur Stromrichtung liegende winzigste Metallnadeln in den Widerstand eingebracht werden, legen die abgelenkten Elektronen einen deutlich längeren Zick-Zack-Weg zurück, was zu einer erheblichen Widerstandsveränderung führen kann.¹

Vektoren

Vektorielle Größen lassen sich als gerichtete Größen auffassen, d.h. sie sind durch einen Betrag und eine Richtung gekennzeichnet. In der Physik sind dies z.B. auch die Kräfte, deren Wirkung auf bewegte elektrische Ladungen in einem Magnetfeld beobachtbar ist (Lorentzkraft).

Mithilfe von Vektoren kann man daher neben der reinen Größe noch weitere Eigenschaften wie Richtungen ausdrücken. In der Physik treten Vektoren beispielsweise als zeichnerische Lösung für Bewegungen und Kräfte auf der schiefen Ebene auf (Gewichtskraft und Zugkraft im Parallelogramm, resultierende Diagonale als anteilige Bewegung des Körpers). Hier gibt die Länge der Kraftpfeile/Vektoren die jeweilige physikalische Messgröße an; das Zusammenspiel der Richtungen ist daher neben der abstrakten Größe ebenfalls von großer Bedeutung.

Im Hinblick auf Magnete spricht man von dem magnetischen Feld, um die Wirkungen und Eigenschaften zu beschreiben. Die speziellen Kraftwirkungen in diesem magnetischen Feld (auf Elektronen in einem Leiter, auf ferromagnetische Stoffe oder weitere Magneten) erklärt man in der Physik über Feldlinien, also über gedachte Kurven, mit denen in einem bestimmten Punkt die Stärke und Richtung des Magnetfeldes beschreibbar ist; so, wie für eine mathematische Funktion zum Beispiel die Steigung angegeben werden kann, die in einem bestimmten Abschnitt den Verlauf einer Parabel beschreibt.

¹ vgl. <http://elektroniktutor.de/bauteilkunde/mdr.html>

Vektorfeld

Ein Vektorfeld besteht aus einer ganzen Ansammlung von Vektoren. Wir stellen uns die Flussdichte des Magnetfeldes und ihre Stärke als Getreidehalme vor, die auf einem Feld wachsen. Das Feld entspricht in diesem Fall der Ebene, in der die Messungen erfolgen. Wenn das magnetische Feld überall gleich ausgeprägt ist und die Feldlinien in die gleiche Richtung zeigen, sind alle Halme gleichlang und stehen parallel.

Veränderungen der Richtung des Magnetfeldes lassen sich zum Beispiel mithilfe von Windböen vorstellen, die die Halme stellenweise in eine andere Richtung biegen, also die Richtung dieser „Vektoren“ ändern.

Ein Vektorfeld ist daher eine flache (2-dimensionale) oder räumliche Anordnung, die zusätzlich zu der Position der Messung (in xy oder xyz) auch die Richtungskomponenten des Kraftvektors des Magnetfeldes darstellt.

(Neu)Entwicklung des Mag3D-Magnetfeldscanners

Unser Magnetfeldscanner – entwickelt und vorgestellt als Projekt für *Schüler experimentieren* 2016 – kann eine Fläche bis zur Größe eines A4-Blattes scannen und zu jedem einzelnen Messpunkt die entsprechende magnetische Flussdichte an diesem Ort als Vektor speichern.

Die magnetische Flussdichte B ist eine vektorielle Größe, d.h. sie hat eine Richtungskomponente – üblicherweise wird diese Richtung als die Richtung der magnetischen Feldlinien bezeichnet. An einem beliebigen Punkt kann die magnetische Flussdichte daher als Vektor $B_{(x|y|z)}$ angegeben werden – die entsprechenden Messwerte für die einzelnen Richtungskomponenten der Flussdichte liefert der verwendete Magnetfeldsensor. Wird dieser in einer Ebene bewegt, wird ein Vektorfeld, das aus den zweidimensionalen Koordinaten $X_E|Y_E$ des Messpunktes und dem dreidimensionalen Vektor für die Flussdichte B besteht, vermessen: Bislang konnte unser Scanner also ein 5D-Vektorfeld vermessen und über die Software MATLAB visualisieren.

Für den diesjährigen Jugend-forscht-Wettbewerb haben wir daher folgende Ergänzungen und Verbesserungen vorgenommen:

- a) Kompletter Designwechsel im Hinblick auf die Scanner-Technik
 - Ausgelegt auf 6D-Vektorfeld (3D-Vektor und 3D-bewegung des Sensors)
 - Herleitung der mathematischen Grundlagen für die Kinematik der Scanner-Technik
- b) Neuprogrammierung des Mikrocontrollers zur Steuerung
 - parallele Kinematik, Herausforderungen für Programmierung
 - Neubau der Elektronik
- c) mathematische Optimierungen
 - Modellbildung zur Abschätzung der magnetischen Flussdichte zwischen den Messpunkten
 - Verfahren zur Unterdrückung von Messfehlern und „Rauschen“

Designwechsel: vom X/Y-Plotter zum Delta-Design – Mathematische Grundlagen

Unser bisheriger Scanner nutzt ein X/Y-Positionssystem („Plotter“), um in einer Ebene den Sensor verfahren zu können. Soll nun als weitere Dimension die Höhenachse hinzukommen, bleiben bei diesem Design zwei Möglichkeiten:

- a) das Messobjekt wird schrittweise angehoben bzw. abgesenkt
- b) der Sensor bzw. die X/Y-Positioniereinheit wird in ihrer Höhe verändert.

Beide Ansätze hielten wir nicht für zielführend. Zum einen ist es schwierig, eine Höhenänderung umzusetzen, ohne die Objekte selbst ggf. zu verschieben (Kabelführung), wenn das Untersuchungsobjekt nicht aus einem Permanentmagneten besteht, sondern z.B. aus einer Anordnung

von Spulen und Stromzuführungen. Im anderen Fall hätten wir unsere gesamte Scannerkonstruktion präzise in der Höhe heben müssen.

Wir haben uns daher entschieden, bei der mechanischen Konstruktion dem Delta-Ansatz zu folgen: 3D-Positionier-Systeme, die nach dem Delta-Prinzip aufgebaut sind, zeichnen sich durch eine klare Struktur und ein einfaches Bauprinzip aus. Der im dreidimensionalen Raum zu bewegendende Aktor (3D-Druck: Druckdüse) oder Sensor (unser Magnetfeldsensor) wird mithilfe von drei Schlitten bewegt, die wie Aufzüge an Säulen hinauf- bzw. hinunter fahren. Die Säulen bilden die Ecken eines gleichseitigen Dreiecks.

An den Schlitten sind zwei Arme befestigt, die dafür sorgen, dass die Sensorplattform parallel geführt wird. Die Arme sind zwischen allen drei Säulen und der Sensorplattform gleich lang – stehen die drei Schlitten auf einer Höhe, befindet sich die Sensorplattform in der Draufsicht genau in ihrer Mitte, dem Mittelpunkt des Koordinatensystems (Schnittpunkt der Winkelhalbierenden/Höhen).

Der Aufbau ist also symmetrisch, und alle drei Schlitten müssen i.d.R. bewegt werden, damit die Sensorplatte eine neue Position erreicht. Die Motoren haben wir am oberen Ende der Schienen angebracht, damit sie die Messungen möglichst wenig stören, auch wenn es aus Stabilitätsgründen (Schwerpunkt) sinnvoller gewesen wäre, sie unten neben dem Messbereich zu platzieren. Die Positionsberechnungen können über eine mehrfache Anwendung des Satzes des Pythagoras erfolgen, da die Schlitten mit den Armen ein rechtwinkliges Dreieck bilden (Arme als Hypotenuse) und über ein weiteres rechtwinkliges Dreieck aus den gewünschten Koordinaten wiederum eine Seite des vorherigen Dreiecks ermittelt werden kann.

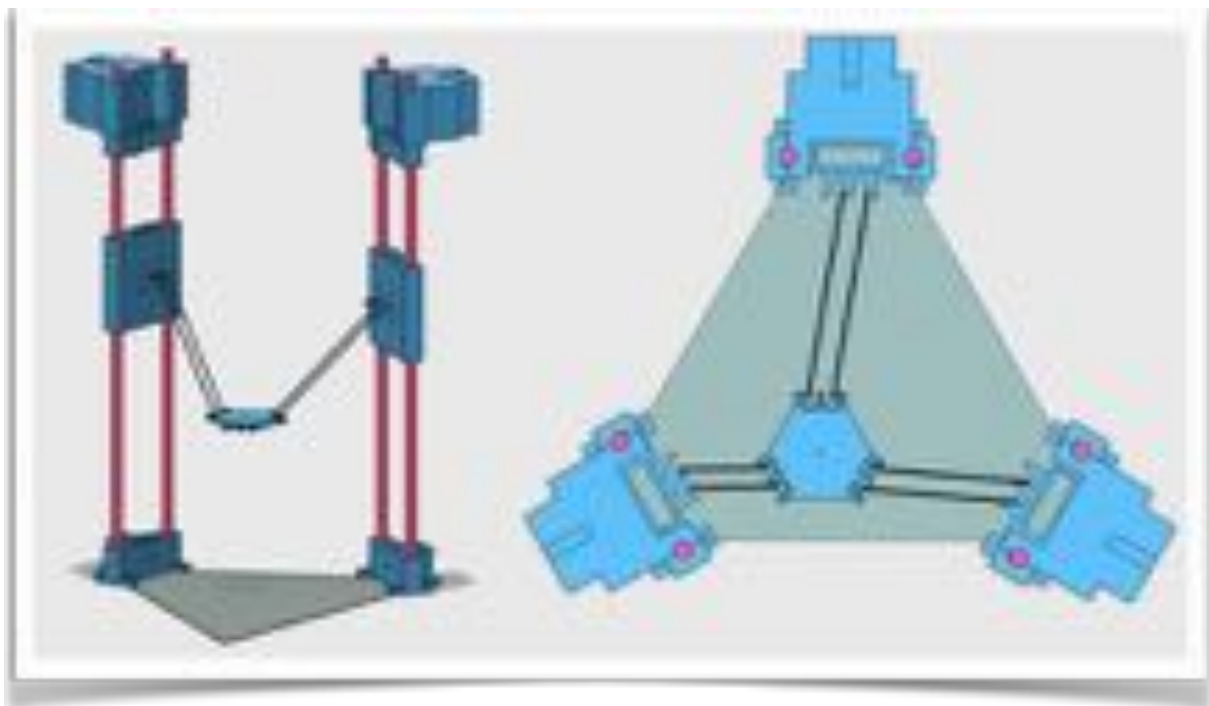


Abbildung 2: CAD-Entwurf unseres Delta-Magnetfeldscanners

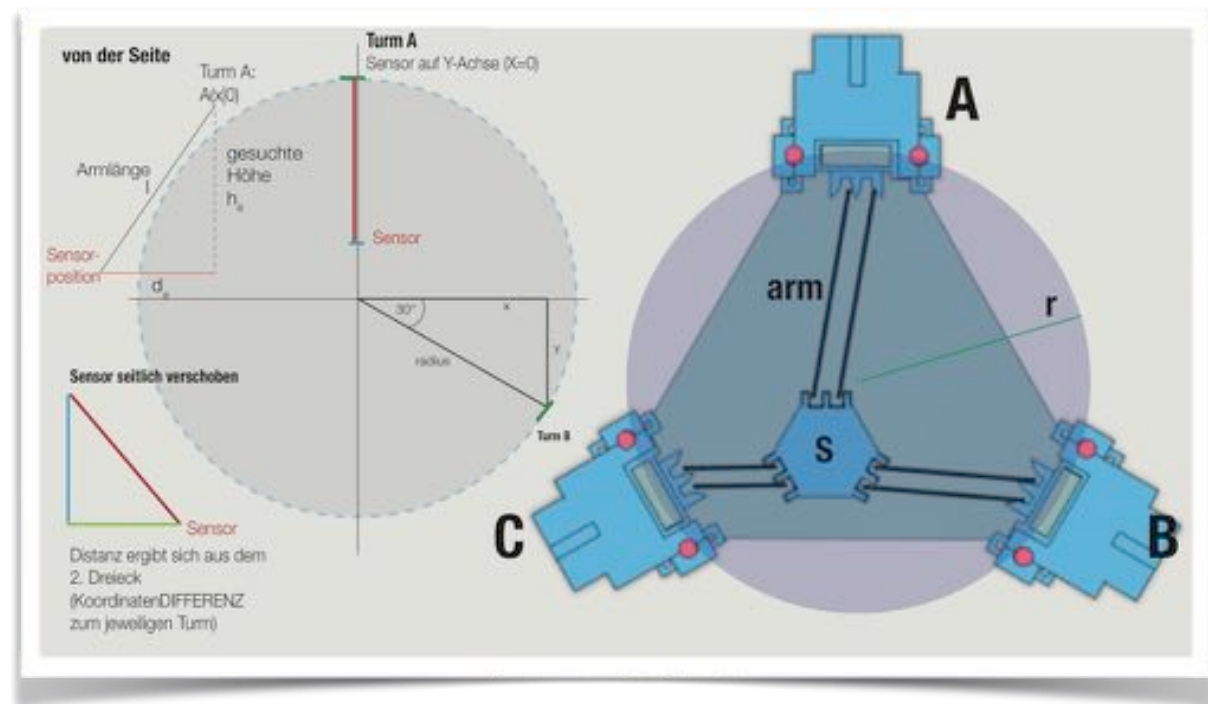
Zwar gibt es für 3D-Drucker fertige Programmierbibliotheken für Delta-Konstruktionen, die G-Code verarbeiten, wir wollten jedoch die Mathematik hinter diesem Ansatz nachvollziehen und haben uns die benötigten Algorithmen selbst hergeleitet. Gesucht ist die Höhe der jeweiligen Schlitten für eine vorgegebene gewünschte Position der Sensorplattform.

Zuerst haben wir die Position der drei Türme/Achsen bestimmt, die in einem Winkel von 120° zueinander stehen sollen. Diese Achsen haben wir so in einem Koordinatensystem platziert,

dass Achse A auf der Y-Achse liegt und daher der Fuß dieser Achse die Koordinaten $(0|r)$ hat, wobei r der Abstand der Türme/Achsen vom Ursprung ist.

Die beiden anderen Fußpunkte sind nicht so direkt bestimmbar, daher haben wir zwei Dreiecke hinzugefügt, um mithilfe von Sinus und Cosinus die jeweiligen Koordinaten zu bestimmen. Um später die Konstruktion beliebig skalieren zu können, haben wir lediglich mit dem Radius r gearbeitet.

Die x-Koordinate des Turms B ergibt sich daher über den Cosinus des Winkels $(120^\circ - 90^\circ)$ im Dreieck: $\cos(\alpha) = \frac{x}{r}$, nach x umgestellt lautet der Term: $x = r \cdot \cos(\alpha)$ mit $\alpha = 30^\circ$. Daher ergibt sich für den Fußpunkt von Turm B die Koordinate $(\cos(30^\circ) \cdot r \mid -\sin(30^\circ) \cdot r)$, für den Fußpunkt von Turm C entsprechend $(-\cos(30^\circ) \cdot r \mid -\sin(30^\circ) \cdot r)$:



A $(0|r)$

B $(\cos(30^\circ) \cdot r \mid -\sin(30^\circ) \cdot r)$

C $(-\cos(30^\circ) \cdot r \mid -\sin(30^\circ) \cdot r)$

$$h = \sqrt{\text{arm}^2 - ((T_Y - S_Y)^2 + (T_X - S_X)^2)}$$

S = Sensorplattform

T = jeweiliger Turm mit Koordinaten (A, B, C)

Abbildung 3: Geometrie des Delta-Scanners

Es entsteht ein rechtwinkliges Dreieck zwischen der Sensorplatte und den einzelnen Achsen, wobei die Hypotenuse die Entfernung zwischen Schlitten und Sensorplatte ist. Da wir die Höhe der Schlitten bestimmen wollen, damit die Schrittmotoren diese anfahren können, wenden wir

den Satz des Pythagoras an: $h_A = \sqrt{l^2 - d_A^2}$. Weil die Achse A als x-Koordinate 0 und als y-Koordinate den Radius r hat und wir uns zur Vereinfachung vorstellen, dass der Sensor sich nur auf der Strecke zwischen dem Mittelpunkt und dem Punkt A bewegt, beträgt die x-Koordinate (X_{sp}) der Sensorplatte ebenso 0, womit die Sensorplatte die Koordinaten $(0|Y_{sp})$ hat und A $(0|r)$. Daraus folgt, dass die Distanz der Sensorplatte und A $d_A = r - Y_{sp}$ für diesen Spezialfall ist.

Wenn der Sensor seitlich verschoben ist, entsteht ein weiteres Dreieck, dessen Katheten die Koordinatendifferenzen zum Turm A sind mit der Hypotenuse d_A – das gilt auch für die anderen Türme.

Die Koordinatendifferenzen lassen sich allgemein als $(T_x - S_x)$ und $(T_y - S_y)$ formulieren mit den jeweiligen Koordinaten der Fußpunkte und denen der Sensorplattform. Für die Höhenbestimmung

der Schlitten geht dieses zweite Dreieck mit der Hypotenuse in das erste Dreieck ein und bildet dort die andere Kathete – die zweite Kathete ist die gesuchte Höhe.

Man erhält also folgende Formel für die allgemeine Berechnung der relativen Höhe der Schlitten in Bezug zur Sensorplattform:

$$h_{a|b|c} = \sqrt{l^2 - ((T_x - S_x)^2 + (T_y - S_y)^2)}$$

Diese Formel lässt sich für alle Türme einsetzen; es müssen lediglich die Koordinaten der Turm-fußpunkte eingesetzt werden. Mathematisch sinnvoll wäre es, die Formeln für die Koordinaten einzusetzen und damit jeweils nur noch eine Abhängigkeit von den Parametern Armlänge und Radius zu haben.

Von der Programmierung des Mikrocontrollers her gesehen ist es jedoch viel sinnvoller, die Koordinaten als Konstanten (über die o.g. Formel) im Programm zu definieren und die selbe Höhenberechnung drei mal mit den jeweiligen Turm-Koordinaten aufzurufen. Hier muss dann nur noch quadriert und die Wurzel gezogen werden; es sind keine trigonometrischen Berechnungen dann nötig auf dem Controller selbst. Der Mikrocontroller ist nicht sehr leistungsfähig was die Berechnung von Fließkommazahlen angeht und so werden etliche Berechnungen gespart.

Neuprogrammierung des Mikrocontrollers – Parallele Kinematik

Während bei einer X/Y-Plotter-Konstruktion immer nur ein Motor angesteuert werden muss, da nacheinander alle Zeilen spaltenweise verschachtelt vermessen werden, ist dies bei dem Delta-Design anders. Hier müssen in der Regel alle drei Motoren gleichzeitig angesteuert werden, die Schlitten jedoch unterschiedlich lange Wege zurücklegen.

So könnte z.B. der Schlitten an der Säule A 4cm in die Höhe fahren, während gleichzeitig Schlitten B um 2cm nach unten und Schlitten C lediglich um 4mm nach unten bewegen muss. Das besondere an dieser Bewegung ist, dass alle Motoren gleichzeitig gestartet werden müssen und ihre Bewegung zum gleichen Zeitpunkt abgeschlossen sein muss. In diesem Beispiel müsste sich also Motor A doppelt so schnell drehen wie Motor B und 10x so schnell wie Motor C (und in die andere Richtung).

Die Schrittmotoransteuerung erfolgt über spezielle Treiberbausteine (IC), die über den Digitalbus I2C angesprochen werden (ebenso wie der Sensor). Die Umsetzung der elektrischen Ansteuerung der Windungen erfolgt durch diese ICs, die Software gibt jeweils vor, wie viele Schritte mit welchem Schrittverfahren erfolgen sollen. Die Schwierigkeit besteht nun darin, dass die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Programmierbibliothek den weiteren Programmablauf anhält (blocking), bis der jeweils angesteuerte Schrittmotor die Anzahl der Schritte absolviert hat – es würden also alle drei Motoren nacheinander angesteuert, nicht gleichzeitig. Eine weitere Bibliothek (Multistepper), die ein gleichzeitiges Ansteuern mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ermöglicht, ist nicht mit der aktuellen Hardware kompatibel.

Wir haben schließlich eine Lösung gefunden, bei der eine Verschachtelung der Bibliotheken zum Erfolg geführt hat: Die Programmierung erfolgt objektorientiert, d.h. zunächst wird die Hardware eingebunden, mit dem neuen Hardware-Objekt werden dann Repräsentationen der drei Schrittmotoren erzeugt (wiederum Objekte), die dann anschließend in die dritte Bibliothek eingebunden werden (als Multistepper-Objekte). Im Programmablauf müssen dann jeweils vor der Positionsangabe zusätzliche Parameter immer wieder neu gesetzt werden (Max.-Geschwindigkeit der Stepper – das liegt an einem Fehler in den Bibliotheken). Auf diesen Umstand sind wir durch systematische Fehlersuche aufmerksam geworden.

Ergänzend zu der Neuprogrammierung des Mikrocontrollers haben wir unsere Smartphone-App überarbeitet, damit die neue Scanner-Konstruktion angesteuert werden kann. Eine App hat den Vorteil, dass der Magnetfeldscanner selbst kein Display und entsprechende Bedienelemente benötigt (Ressourcenersparnis). Die Smartphone-App haben wir mit MIT App Inventor 2 entwickelt:

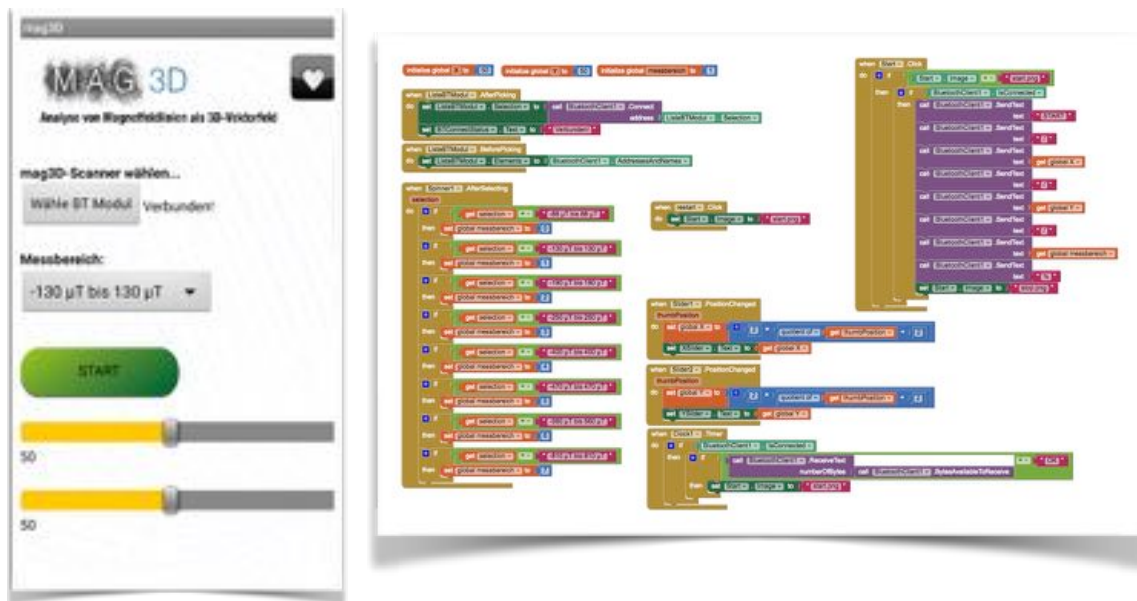


Abbildung 4: Steuer-App für Smartphones und Programmierung mit MIT App Inventor 2

Das Smartphone ist über ein Bluetooth-Modul mit dem Mikrocontroller verbunden. Mit der App kann man die maximale Auflösung des Sensors sowie Größe des zu messenden Feldes in x- und y-Richtung einstellen und den Messvorgang starten bzw. stoppen. Sollte dieser Vorgang nicht funktionieren (Funkstörung), kann man den Vorgang neu starten. In der Weiterentwicklung wird dann auch die Höhe über dem Messfeld zusätzlich wählbar sein, ebenso wie die Anzahl der Schichtaufnahmen.

Neubau der Elektronik

Da zum Zeitpunkt des Neubaus die bisherige fischertechnik-Konstruktion die einzig funktionierende ist, haben wir uns entschieden, einen kompletten Neubau zu starten und keine Teile dieser Scannerkonstruktion zu verwenden (zur Sicherheit).

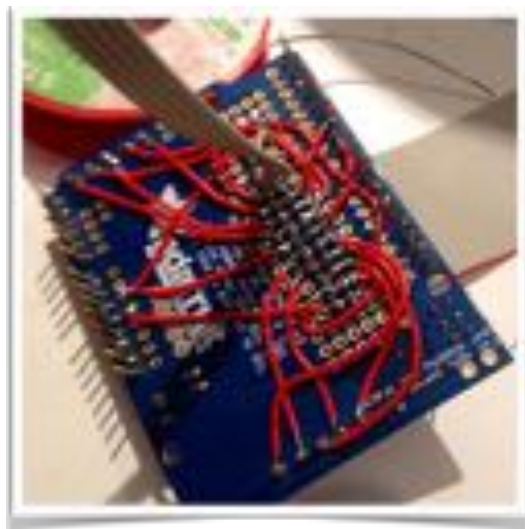


Abbildung 5: Neubau Elektronik – Verlöten des Flachbandkabels an die Treiberelektronik

Wir haben daher die Verkabelung neu verlöten müssen, damit der gesamte Scanner inklusive Sensor und Motoren nur über ein einziges Flachbandkabel angeschlossen werden kann. Weiterhin haben wir Taster eingebaut, mit denen vor einem Scan die Position der Schlitten kalibriert

werden kann: Die Schlitten werden so lange nach oben gefahren, bis die drei Taster geschlossen sind. So ist zu Beginn eine eindeutige Position gegeben, denn Schrittmotoren stellen ein offenes Regelsystem dar, es gibt kein Feedback, ob sie die Position wirklich erreicht haben; die Software zählt jeweils die Schritte mit. Daher ist zu Beginn eine Kalibrierung notwendig.

Auch den Sensorchip (mit einem Breakout-Board, der IC selbst ist ein SMD-Bauteil) haben wir neu mit dem Flachbandkabel angeschlossen.

Exkurs: Einladung zum Fraunhofer-Institut IIS Erlangen

Im Oktober 2016 hatten wir die Möglichkeit, unseren Magnetfeldscanner im Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen in Erlangen der Abteilung für Integrierte Sensorsysteme vorzustellen.

Im Anschluss an unsere Präsentation hat Herr Dr. Hohe, der Gruppenleiter, uns das Institut und vor allem die institutseigene Magnetfeldkamera „HallinSight“ genauer vorgestellt. Diese Kamera besteht aus einem 4x4 cm großen Messbereich, der von einem Sensorarray mit 16x16 Messpunkten gebildet wird. Jeder der Messpunkte ermittelt die magnetische Flussdichte in allen drei Raumrichtungen – auch hier werden also an jedem der 256 Messpunkte Vektoren des Magnetfeldes B gemessen und zur Auswertung an die vom Fraunhofer-Institut selbst entwickelte Computersoftware „HallinSight“ übertragen.

Die Messungen und Visualisierungen erfolgen dabei in Echtzeit, d.h. jede Veränderung des Magnetfeldes (z.B. Drehen des Magneten) wird unmittelbar durch eine Veränderung der bildlichen Darstellung sichtbar. Auch schnelle Fluktuationen im Magnetfeld können sichtbar gemacht werden.

Dr. Hohe und Dr. Peters vom Fraunhofer IIS waren so freundlich, uns zwei dieser Magnetfeldkameras als Dauerleihgabe zur Verfügung zu stellen, die in unseren Schulen im Physikunterricht eingesetzt werden und mit denen wir unsere Forschung voranbringen können.

Dies gibt uns die Möglichkeit, unseren eigenen Magnetfeldscanner mit einem professionellen Mess-System zu vergleichen – wir werden zur Präsentation unseren Scanner mit der Magnetfeldkamera vergleichen. Im Fraunhofer IIS haben wir durch den Austausch mit verschiedenen Mitarbeitern viele Tipps und neue Anregungen für unser Projekt sammeln können. So haben wir zum Beispiel den Tipp bekommen, dass man auch noch andere Visualisierungsprogramme, zum Beispiel Wolfram Alpha, in Betracht ziehen könnte, oder das man bei unserem Delta-Modell mit Kugellagern arbeiten könnte, um die Beweglichkeit der drei verschiedenen Schienen in alle Richtungen besser umsetzen zu können. Auch die Idee, nach mathematischen Optimierungen für die „Roh-Daten“ zu suchen, haben wir durch diesen Besuch und die Arbeit mit der Magnetfeldkamera erhalten.

Mathematische Optimierungen

Uns ist bei verschiedenen Messungen aufgefallen, dass die Visualisierung des Vektorfeldes Sprünge aufweisen kann, wenn der Dynamikbereich des jeweiligen Messfelds nicht vollständig ausgeschöpft ist. Daher haben wir uns die Frage gestellt, mit welchen mathematischen Algorithmen wir die Messergebnisse verbessern können, da der Sensor selbst ein SMD-Bauteil ist, das wir nicht verändern können.

Messgenauigkeit: Messreihen, Mittelwert, Streuung

Klassischerweise ersetzt man eine Einzelmessung durch eine Messreihe und gibt die Verteilung der Werte durch zentrale Parameter wieder (Datenreduktion). Eine Möglichkeit, Verteilungen wiederzugeben, sind Mittelwert und Standardabweichung (Streuung). Der Mittelwert lässt sich durch ein Aufsummieren der Einzelmessungen geteilt durch die Anzahl der Messungen ermitteln; die Streuung gibt an, wie nah die Messungen beieinander liegen – je kleiner die Streuung, desto näher liegen die Messwerte beieinander und können durch einen einzelnen zentralen Wert wiedergegeben werden. Der Sensor selbst ermöglicht eine Mittelwertbildung und überträgt an den Mikrocontroller das durch 2-fache, 4-fache oder 8-fache Messungen gebildete arithmetische

Mittel. Die folgende Grafik zeigt, dass durch diese Maßnahme die Streuung der Messwerte halbiert werden kann (1-fach vs. 8-fach).

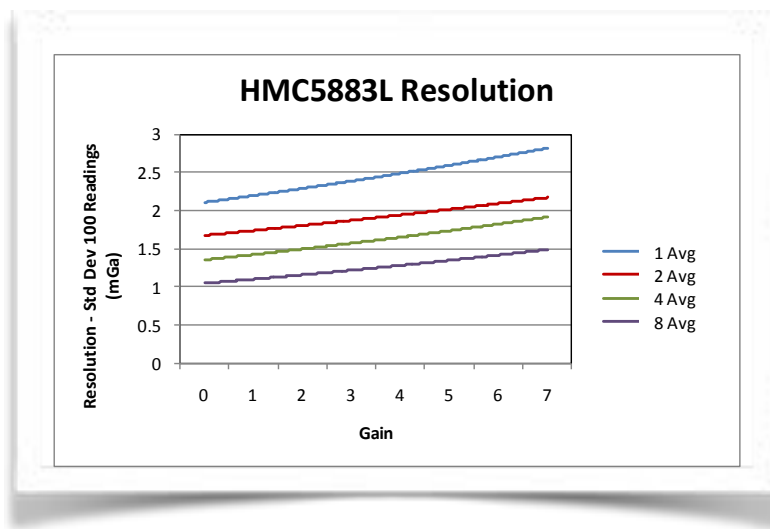


Abbildung 6: Vergleich der Streuung bei Mehrfachmessungen (sensorintern).
Quelle: Datenblatt zum Sensor HMC588L, S. 8

Manche unserer Messungen dauern recht lange, wenn wir ein großes Messfeld eingestellt haben – denn eine Verdopplung der Auflösung oder des Messfeldes auf zwei Achsen führt zu einer vierfach höheren Datenmenge und Scann-Dauer (quadratischer Zusammenhang). Wird das auf die z-Achse übertragen, verdoppelt sich die Zeit für eine Gesamtmessung (kubischer Zusammenhang).

Interpolation – schneller oder genauer messen

Da die einzelnen Messpunkte in einem sehr geringen Abstand zueinander liegen (wenige mm), ist es unwahrscheinlich, dass zwischen ihnen eine extreme Abweichung im Magnetfeld vorliegt, die die benachbarten Punkte unberührt lässt. Die Frage, die sich hier anschließt, ist, ob nicht ein „größer“ aufgelöstes Messfeld mithilfe von Abschätzungen auch Aussagen zu dem Verlauf des Magnetfeldes zwischen den Punkten zulässt. Im einfachsten Fall könnte man die Zwischenwerte über eine lineare Funktion finden – so wie sich eindimensionale Messwerte z.B. mit einem Streckenzug verbinden ließen. Die folgende Grafik zeigt den Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung in einem 20x20 Punkte umfassenden Messfeld.

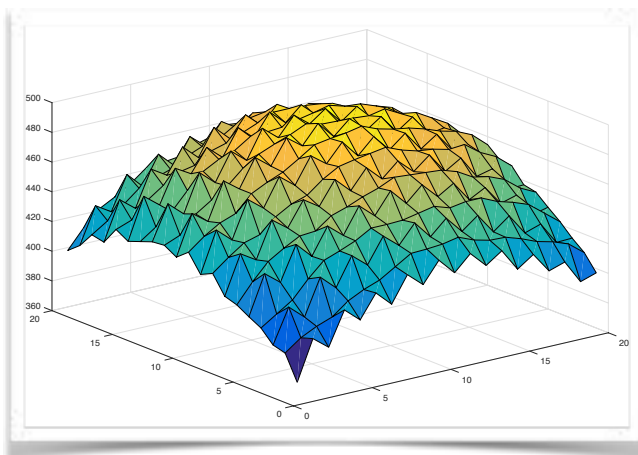


Abbildung 7: Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld

In MATLAB haben wir dann eine Funktion entdeckt, die mathematisch zwischen einzelnen Messergebnissen Annäherungswerte errechnet: Die Spline-Funktion. Ausgehend von den benachbarten Punkten (z.B. in einem 3x3 oder 5x5-Raster) rekonstruiert sie einen grafischen Verlauf,

auf dem diese Messwerte liegen. Sie werden also nicht durch einfache Streckenzüge, sondern durch abgerundete Kurven beschrieben, mit deren Hilfe sich in diesem kleinen Ausschnitt Zwischenwerte ablesen lassen:

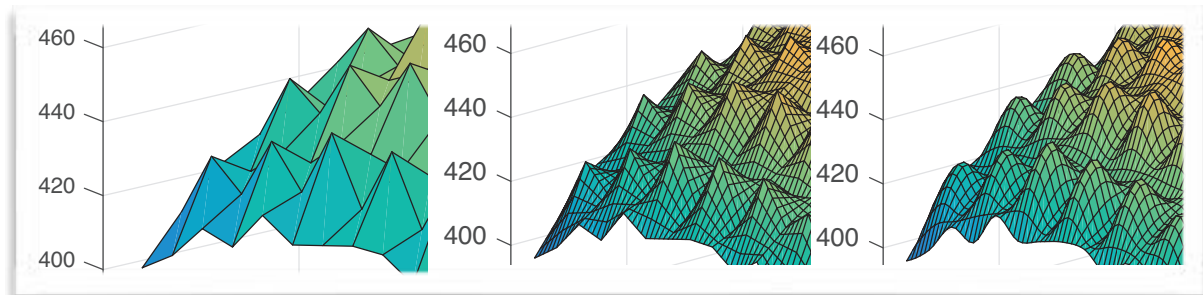


Abbildung 8: Vergleich der Interpolation – Originaldaten, lineare und quadratische/SPLINE-Interpolation
Ausschnitt – Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld

Diese Funktion können wir nutzen, um Felder schneller oder mit höherer Auflösung zu vermessen. Wenn wir bei einem 100x100 Feld zum Beispiel nur alle 5 Schritte eine Messung durchführen, statt jeden einzelnen Schritt zu messen, kann der Messvorgang 25 mal schneller werden. Aus der oberen Grafik ist jedoch auch ersichtlich, dass die Messwerte trotz Mittelwertbildung an jedem Messpunkt noch deutlich „rauschen“. Eine Hochrechnung kann diese Ungenauigkeiten verstärken, sodass wir nach einer Möglichkeit gesucht haben, Rauschen in Vektorfeldern reduzieren zu können. In dem Beitrag von Liu (2013) wird ein solches Verfahren am Beispiel geophysikalischer Messdaten beschrieben – die Besonderheit liegt darin, dass die Messwerte gleichzeitig in die Berechnung eingehen, da angenommen werden kann, dass ihnen ein gemeinsames Phänomen zugrunde liegt:

“Because each component of a vector field reflects a certain property of a common objective, there may be some coherent relation between these components. Therefore, it can be beneficial to process all components of a vector field simultaneously, rather than treat each component as an independent scalar field. We introduce the VMF to reduce noise in vector fields.” Liu (2013, S. V79)

Der Median ist bei einer Reihe von Messwerten derjenige Wert, der die aufsteigende Verteilung halbiert. Dies sei für Vektoren schwer umzusetzen, weswegen Liu (2013) vorschlägt, den Median-Vektor zu definieren als denjenigen Vektor, der den geringsten Abstand zu allen anderen Vektoren hat. MATLAB verfügt ebenfalls über die Möglichkeit, einen Vektormedianfilter zu berechnen². Die spezifischen Charakteristika des Feldes bleiben dabei erhalten. Wir haben mit dieser Filterfunktion zunächst die 20x20 Messpunkte umfassende Magnetfeldanalyse (s. Abbildung 9 folgende Seite) geglättet:

2 So berechnet z.B. `medfilt2(zf, [9 9], 'symmetric')` ein neues Vektorfeld „filter“ basierend auf den z-Komponenten des gemessenen Feldes mit einer 9x9 Matrix aus Nachbarschaft-Vektoren. Werte am Rand des gesamten Feldes (dort fehlen die Nachbarn an den Rändern) werden symmetrisch ergänzt.

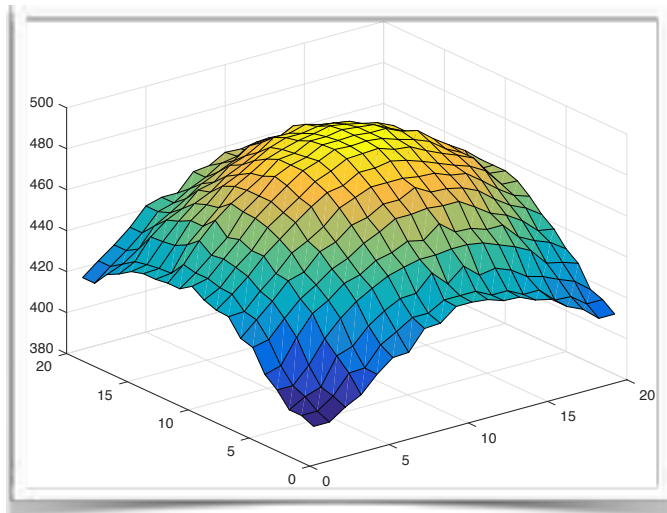


Abbildung 9: Rauschunterdrückung mit Vektorfeld-Medianfilter (5x5 Nachbarn)
 Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld

Um die Möglichkeit der Interpolation der Daten zu überprüfen – damit ließen sich große Felder mit gleichbleibender Dauer vermessen oder höhere Auflösungen – haben wir ohne eine Positionsänderung denselben Magnetpol einmal mit einer 5-fach feineren Auflösung vermessen und einmal aus der oberen Messung die höhere Auflösung per SPLINE-Befehl mathematisch erzeugt zusammen mit einer Rauschunterdrückung. Die folgende Grafik zeigt die Gegenüberstellung:

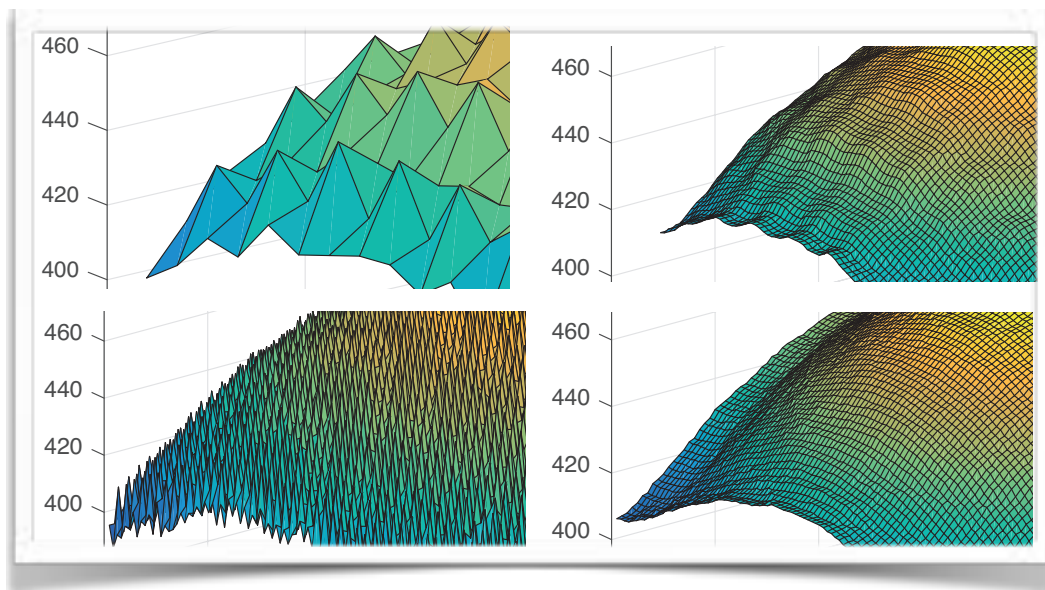


Abbildung 10: Interpolation und Rauschunterdrückung:
 a) Original-Messwerte ohne Optimierung (20x20),
 b) Interpolation auf 100x100 Messpunkte und Vektorfeld-Medianfilter (15x15 Nachbarn)
 c) Original-Messwerte ohne Optimierung (100x100; je 5fach feinere Schrittweite),
 d) Vektorfeld-Medianfilter (20x20 Nachbarn), keine Interpolation
 Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld

Sehr gut ist erkennbar, dass die einzelnen Messwerte (Oberflächendarstellung) trotz 8-facher Mittelwertbildung an jedem Mess-Ort selbst noch sprunghaft sind und rauschen; besonders deutlich ist das bei der 5-fach genaueren, „echten“ Messung. Wenn über die hohe Dichte an empirischen Messwerten („echte“ Messung) ein Vektor-Median-Filter berechnet wird, ergibt sich eine sehr elegante Glättung des Rauschens.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass wir unser Ziel, ein Messverfahren zu entwickeln, welches Magnetfelder vermisst und visualisiert, erreicht haben.

Mit der Entwicklung unserer neuen Konstruktion arbeiten wir daran, Magnetfelder auch in 6D, also in Ebenenschnitten zu vermessen – die Vorbereitungen dafür sind abgeschlossen.

Da wir unsere Konstruktion mithilfe einer selbst programmierten App über ein Smartphone steuern, ist die Konstruktion einfach zu bedienen und der Arduino muss nicht jedes Mal an einen Computer angeschlossen werden.

Unsere Konstruktion ermöglicht eine automatisierte und zuverlässige Erfassung des Vektorfeldes der magnetischen Flussdichte und eine Übertragung der Daten auf einen Computer zur Visualisierung. Diese Konstruktion kann das Magnetfeld erfassen, ohne es zu verändern.

In Zukunft möchten wir das System für unsere Delta-Konstruktion weiter programmieren, so dass das räumliche Vermessen von Magnetfeldern mit unserer Konstruktion und ggf. auch eine Datenspeicherung in weiteren Formaten möglich wird. Hier wäre dann eine Migration des Gesamtsystems auf den Raspberry Pi zu überlegen.

Abbildungen

Abbildung 1:	Magnetfeldscanner mit fischertechnik X/Y-Plotter	4
Abbildung 2:	CAD-Entwurf unseres Delta-Magnetfeldscanners.....	7
Abbildung 3:	Geometrie des Delta-Scanners	8
Abbildung 4:	Steuer-App für Smartphones und Programmierung mit MIT App Inventor 2	10
Abbildung 5:	Neubau Elektronik – Verlöten des Flachbandkabels an die Treiberelektronik ...	10
Abbildung 6:	Vergleich der Streuung bei Mehrfachmessungen (sensorintern). Quelle: Datenblatt zum Sensor HMC588L, S. 8	12
Abbildung 7:	Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld	12
Abbildung 8:	Vergleich der Interpolation – Originaldaten, lineare und quadratische/ SPLINE-Interpolation. Ausschnitt – Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld	13
Abbildung 9:	Rauschunterdrückung mit Vektorfeld-Medianfilter (5x5 Nachbarn) Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld	14
Abbildung 10:	Interpolation und Rauschunterdrückung: a) Original-Messwerte ohne Optimierung (20x20), b) Interpolation auf 100x100 Messpunkte und Vektorfeld-Medianfilter (15x15 Nachbarn) c) Original-Messwerte ohne Optimierung (100x100; je 5fach feinere Schrittweite), d) Vektorfeld-Medianfilter (20x20 Nachbarn), keine Interpolation Pol eines Neodym-Magneten aus 7cm Entfernung; 20x20 Messfeld	14

Literatur

Datenblatt zum Sensor HMC5883L

Hwang, J., et al. (2007). "Scan Type Magnetic Camera Images with a High Spatial Resolution for NDT Obtained By Using a Linearly Integrated Hall Sensors Array." International Workshop on Imaging Systems and Techniques- IST2007 Krakow, Poland, May 4-5, 2007.

Kimbrough, S., et al. (2014). Das Magnetfeld der Erde. Smartphones im naturwissenschaftlichen Unterricht. Berlin, Science on Stage Deutschland e.V.: 64-68.

Lee, J., et al. (2009). "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array." Journal of Mechanical Science and Technology 22(12): 2310-2317.

Lee, J., et al. (2010). "An Application of a Magnetic Camera for an NDT System for Aging Aircraft." Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing 30(2).

Lindow, H. (2012). Bildgebende Verfahren und Komponenten für die zerstörungsfreie Materialprüfung unter Einsatz magnetischer Sensorarrays. Schlussbericht BIMAS. Magdeburg.

Liu, Y. (2013). Noise reduction by vector median filtering. Geophysics 78(3): V79-V87

Tewes, M., et al., Sensorgestützte Experimente zum Elektromagnetismus. T3 Physik. 2016, Berlin/München.

Unterstützung

Die Firma Mathworks unterstützt unsere Arbeit mit kostenlosen Lizenzen der Software MATLAB2016. Ganz herzlichen Dank daher an Herrn Dr. Sebastian Groß von Mathworks!

Rasch Multimedia unterstützt uns in Grafik- und Layoutfragen, dem Druck der Plakate für den Wettbewerb und zeigt uns den Umgang mit DTP-Programmen.

Herr Dr. Hohe und Herr Dr. Peters vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen in Erlangen haben unseren Schulen jeweils eine Magnetfeldkamera als Dauerleihgabe zur Verfügung gestellt, sodass wir Vergleichsmessungen der Vektorfelder durchführen konnten. Aus der Arbeit mit der Magnetfeldkamera haben wir auch die Anregung für eine Interpolation und Glättung der Sensorwerte erhalten.