

Bachelorthesis

Ahmed Albounyan

Charakterisierung magnetischer
Winkelsensoren mittels Kreuzspulenmessplatz

Ahmed Albounyan
Charakterisierung magnetischer
Winkelsensoren mittels
Kreuzspulenmessplatz

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Regenerative Energiesysteme und
Energiemanagement
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter: Prof. Dr. Klaus Jünemann

Abgegeben am 20. Dezember 2018

Ahmed Albounyan

Titel der Bachelorthesis

Charakterisierung magnetischer Winkelsensoren mittels Kreuzspulenmessplatz

Stichworte

AMR-Effekt, TMR-Effekt, Magneto-resistiver Sensor, Winkelsensor, Magnetische Messung, Gerätesteuerung, Kreuzspulenmessung, Hysterese, Kennfeld

Kurzzusammenfassung

In dieser Abschlussarbeit werden die Messung der Kennfelder sowie die Untersuchung der Hysteresebereiche von verschiedenen Magneto-resistiven Winkelsensoren in unterschiedlichen Kreuzspulenmessplätzen durchgeführt. Dafür wird eine Messschaltung in Betrieb genommen und auf vorhandene MATLAB-Skripte zurückgegriffen. Um mit den Spulen ein Magnetfeld zu generieren, werden zwei Leistungsverstärker verwendet, die mit einem Funktionsgenerator angesteuert werden. Zudem wird ein Luft-Kreuzspulenmessplatz simuliert, entworfen und gefertigt. Mit diesem können detaillierte Untersuchungen von TMR-Winkelsensoren angestellt werden. Die Kennfelder sowie die Hysteresebereiche sind mithilfe eines MATLAB-Skripts dargestellt.

Ahmed Albounyan

Title of the Bachelorthesis

Characterization of magnetic angle sensors by using of cross-coil measuring setups

Keywords

AMR effect, TMR effect, magneto-resistive sensor, angle sensor, device control, cross-coil measurement, characteristics field diagram, hysteresis

Abstract

In this thesis, the measurement of the characteristics field diagram as well as the examination of the hysteresis of various angle sensors are carried out in different cross-coil measurement setups. This is achieved by construction of a measurement circuit and modifying existing MATLAB scripts. To generate a magnetic field with the coils, two power amplifiers are used, which are controlled by a function generator. During this work a new cross-coil measurement setup is simulated, designed and manufactured. This new cross-coil setup allows detailed inspection of TMR angle sensors. The characteristics field diagrams and hysteresis are evaluated in a MATLAB script.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herr Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider, der meine Bachelorarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken sowie bei Prof. Dr. Klaus Jünemann, der meine Arbeit als Zweitprüfer bewertet.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn M.Sc. Thorben Schütthe und Herrn Dipl. Ing. Günter Müller bedanken, die mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen sowie bei der Korrektur dieser Arbeit. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Bachelorarbeit in dieser Form vorliegt,

Ein besonderer Dank gilt allen Teilnehmern des ISAR-Teams, Herr Jörg Pflüger und Frau Leonie Herzog ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können. Mein Dank gilt ihrer Informationsbereitschaft und ihren interessanten Beiträgen und Antworten auf meine Fragen.

Meiner Frau Saja Alsahoo danke ich besonders für den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meines gesamten Studiums.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Yousef Albounyan und Nora Aldabal bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten.

أَحْمَدُ يَوْسُفَ الْبُونِيَانِ

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Motivation und Ziel	1
1.2	Einordnung und Vorgehensweise	1
2	Grundlagen	4
2.1	Magnetismus	4
2.2	Magnetismus in der Materie	7
2.3	Überblick über die Magnetwiderstandeffekte	10
2.4	Das Prinzip und der Aufbau des anisotropen Magnetwiderstands (AMR)	10
2.5	Das Prinzip und die Eigenschaften des Tunnelmagnetwiderstands (TMR)	12
2.6	Aufbau und Funktionsweise des TMR-Sensors	13
2.7	Vergleich der magnetischen Winkelsensoren AMR und TMR	16
3	Kreuzspulenmessplatz zur Sensorcharakterisierung	18
3.1	Softwaresteuerung von Oszilloskop und Funktionsgenerator	18
3.2	Aufbau und Funktionsweise der Kreuzspulenmessplatz	20
3.3	Anforderungen und Vorgehensweise	23
3.4	Planung und Konstruktion der neuen Luftkreuzspule	24
3.5	Spulenfaktor und Kennfeldvermessung	34
3.6	Probleme mit dem Shuntwiderstand	37
4	Messung und Ergebnisse	38
4.1	Positionierung des Sensors im Kreuzspulenmessplatz	38
4.2	Messeinstellung	39
4.2.1	Messdurchläufe	39
4.2.2	Spannungsamplitude und die Frequenz	40
4.2.3	Amplitudenmodulation	42
4.2.4	Signallaufzeit	43
4.2.5	Die Aufnahmelänge und weitere Einstellungen	43
4.3	Messergebnisse	45
4.3.1	Messergebnisse der Eisenmessplatz	45
4.3.2	Messergebnisse des Kegelluftmessplatzes	48
5	Schlussfolgerungen	52
5.1	Zusammenfassung	52
5.2	Ausblick und Verbesserungsvorschläge	52
	Literaturverzeichnis	55

Abbildungsverzeichnis	57
Tabellenverzeichnis.....	58
Anhang A: Eine kurze Anleitung für den neuen Messplatz:.....	59
Anhang B: Aufgabenstellung	61
Anhang C: MATLAB Code	63
Anhang D: Technische Zeichnungen	93

1 Einleitung und Motivation

1.1 Motivation und Ziel

Die Fahrsicherheit im Automobilbereich ist ein sehr wichtiger Aspekt. Um sie zu verbessern und die Gefahren zu verringern, muss das Auto besser kontrolliert und gesteuert werden. Eine wesentliche Hilfe dafür ist die Einsetzung des Winkelsensors in verschiedenen Systemen des Automobils. Ein Winkelsensor kann für Stellungserfassung der Drosselklappe, des Lenkradwinkels sowie der Gaspedalstellung verwendet werden. Außerdem kann der Winkelsensor zur Messung des Schlupfes bzw. des Rotorwinkels und Stromsensoren zur Vermessung der Dreiphasenwechselspannung bzw. des Dreiphasenwechselstroms verwendet werden.

Die in dieser Arbeit betrachteten magnetischen Winkelsensoren nutzen Magnetwiderstandseffekte wie den anisotropen Magnetwiderstand (AMR) und den Tunnelmagnetwiderstand (TMR). Durch diese Effekte ist es möglich, die Änderung eines Magnetfeldes zu messen. Die Funktionsweise sowie der Aufbau werden in Kapitel 2 beschrieben.

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene TMR-Winkelsensoren und einen AMR-Winkelsensor untersucht. Für die TMR-Winkelsensoren werden der AAT001-10E der Firma NVE und TAS2141-AAAB der Firma TDK verwendet. Für den AMR-Winkelsensor wird der KMZ60, der von Firma NXP hergestellt wird, verwendet. Ziel dieser Arbeit ist eine vollständige Charakterisierung der genannten magnetoresistiven Winkelsensoren sowie die Gegenüberstellung ihrer Verhalte.

Die Motivation beinhaltet die Zielsetzung, zunächst die Kennfelderfassung der genannten Magnetwinkelsensoren sowie die Synthese des Sensorausgangssignals umfassend zu beschreiben. Dabei wird jeder Sensor in zwei verschiedenen Kreuzspulenmessplätzen, einmal mit und einmal ohne Eisenkern getestet.

1.2 Einordnung und Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit ist ein Teil des Forschungsprojekts „ISAR-(Signalverarbeitung für Integrated Sensor-Arrays basierend auf dem Tunnel-Magnetoresistiven-Effekt für den Einsatz in der Automobilelektronik)“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird. In diesem Projekt sollen eine maßgeschneiderte Signalverarbeitung und die Systemarchitektur für die nächste Generation von magnetischen Sensoren – Sensor-Arrays – entwickelt werden.

In bisherigen Abschlussarbeiten wurde der AMR-Sensor in verschiedenen Kreuzspulenkästen getestet und das Kennfeld sowie die Kennlinien mit verschiedenen magnetischen Feldstärken dargestellt. Drei verschiedene Kreuzspulen mit unterschiedlichen Feldstärken wurden von Siebenmorgen gebaut [1]. Die maximal erreichte magnetische Feldstärke wurde vom Groß-Feld-Kasten verwirklicht und erreicht bis ± 22 kA/m. Der Klein-Feld-Kasten hat eine

Feldstärke von $\pm 3,8$ kA/m und der Mittel-Feld-Kasten besitzt eine von ± 9 kA/m. In der folgenden Abschlussarbeit von Zippel wurde ein neuer Kreuzspulenmessplatz mit Elektroblechkern gebaut [2]. Dieser kann eine magnetische Feldstärke von ca. ± 50 kA/m erzeugen.

Für die Charakterisierung des TMR-Sensors sind die Kreuzspulen mit Eisenkern gut für die Darstellung des Kennfeldes geeignet. Für die Darstellung der Hysterese des Winkelsensors wird eine Luftkreuzspule mit einer Feldstärke von ± 20 kA/m benötigt, welcher nicht im Labor vorhanden ist. Fließt ein größerer Strom als 20 A in dem Klein-Feld-Kasten, kann dieser zerstört werden. Daher kommt die Idee des Entwurfs eines neuen Kreuzspulenkastens. Der Entwurf und die Konstruktion werden in Kapitel 3 vorgestellt.

Der Aufbau der Abschlussarbeit wird in Abbildung 1 visualisiert. Sowohl die Bearbeitung des Themenkomplexes als auch die Vorgehensweise in dieser Bachelorarbeit wird dargestellt. Die erste Aufgabe dieser Arbeit war die Verbindung und die Steuerung der Geräte. Die letzte Arbeit mit dem gesamten Messungssystem wurde von Zippel im Jahr 2011 durchgeführt [2]. In dieser Arbeit soll das gesamte Messungssystem wiederbelebt und für die neuen Messungen vorbereitet werden. Die Verbindungs- und Steuerungsverfahren werden in Kapitel 3 erläutert.

Die Messschaltung wird nach Krey [3] und Riemschneider aufgebaut. Die beiden Leistungsverstärker vom Typ KEPCO BIPOLAR sollen so eingestellt werden, dass sie den gleichen Verstärkerfaktor haben. Für jeden Sensor wird ein Halter konstruiert. Danach wird der Sensor vermessen und das Kennfeld dargestellt. Das Verfahren der Charakterisierung des Kreuzspulenkastens wurde von Zippel [2] und Siebenmorgen [1] vorgestellt und wird hier erwähnt. Bei der Auslegung der Kreuzluftspule kommt die Magnetfeld-Simulations-Software FEMM (Finite Element Method Magnetics) zum Einsatz. Die Software berechnet und simuliert das statische Magnetfeld des Kreuzluftspulmodells und hilft zur Bestimmung der Eigenschaften der Systemelemente. Dazu gehören sowohl magnetische als auch geometrische Eigenschaften. Die Vermessung wird in Kapitel 3 beschrieben.

Im vierten Kapitel werden die Messeinstellungen, Messergebnisse und die Auswertung vorgestellt. Die Arbeit wird mit einem Fazit und einem Ausblick abgeschlossen.

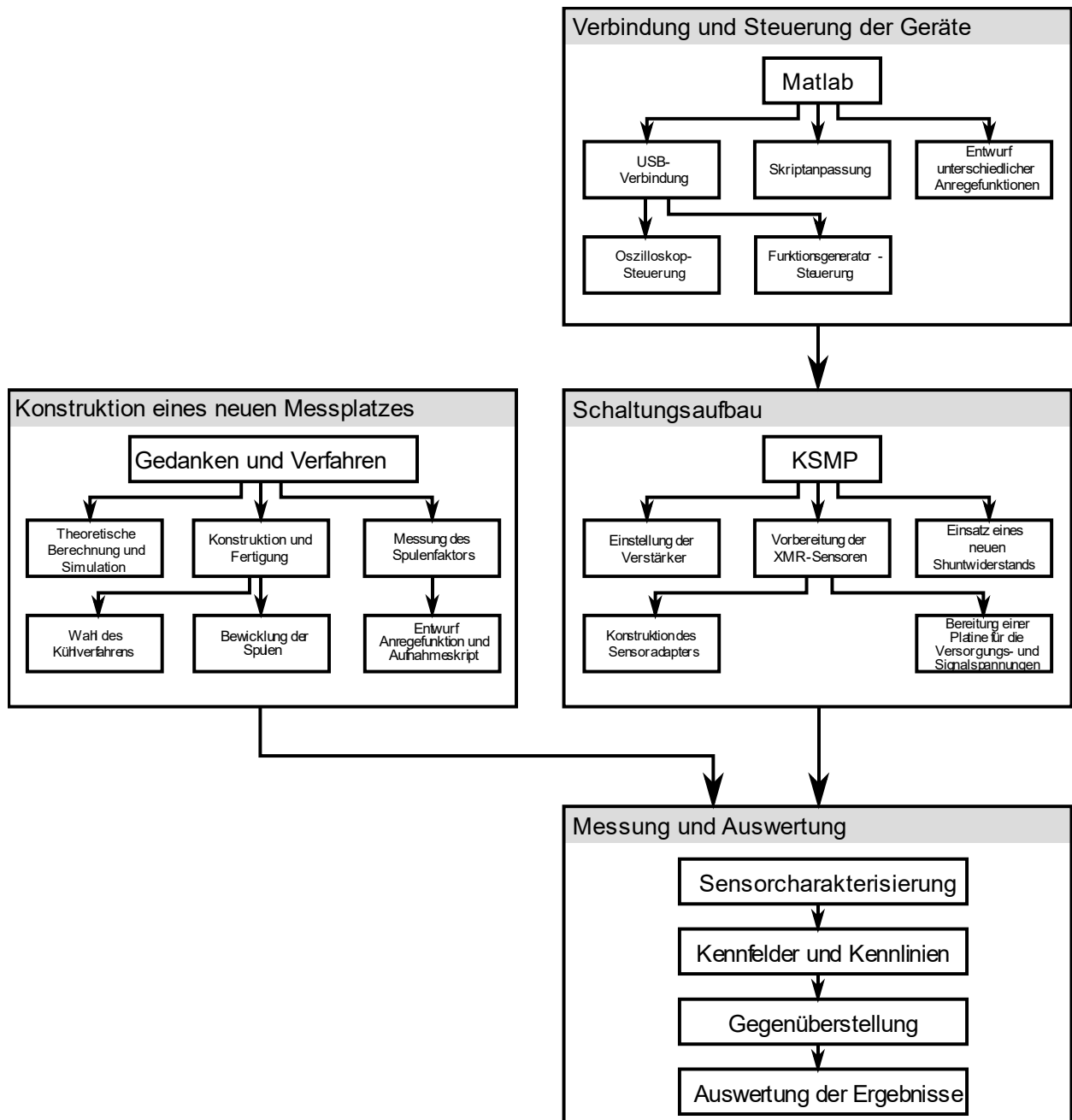


Abbildung 1: Struktur der Vorgehensweise in dieser Bachelorarbeit

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen dargestellt, die in dieser Arbeit benötigt werden, um die grundlegenden Begriffe des Magnetismus sowie der Materie zu verdeutlichen. Als Erstes wird der Magnetismus sowie dessen Anforderungen vorgestellt. Danach werden die magnetischen Einwirkungen auf die Materie und deren Eigenschaften behandelt. Darauf folgend werden die AMR- und TMR-Effekte sowie die verwendeten Winkelsensoren und deren grundsätzlicher Aufbau beschrieben. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird ein Vergleich zwischen den Winkelsensoren sowie deren Effekte veranschaulicht.

2.1 Magnetismus

„Magnetismus ist ein physikalisches Phänomen, das sich als Kraftwirkung zwischen Magneten, magnetisierten Gegenständen und bewegten elektrischen Ladungen wie z. B. in stromdurchflossenen Leitern äußert. Über ein Magnetfeld wird diese Kraft vermittelt.“ [4]

Das Magnetfeld kann durch zwei Methoden entstehen. Zum einen kann bei jeder Bewegung von elektrischen Ladungen ein Magnetfeld entstehen. Zum andern kann das Magnetfeld durch das magnetische Moment der Elementarteilchen entstehen, als Folge ihres Spins, was zu Dauermagneten und anderen magnetischen Eigenschaften von Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen führen [4].

Die Stärke des Magnetfeldes kann mit der magnetischen Feldstärke H [A/m, Ampère pro Meter] und der magnetischen Flussdichte B [T, Tesla, $1\text{T} = \text{V}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] beschrieben werden. Bei einem Umlauf des Stroms um einen Leiter gilt nach dem Durchflutungsgesetz für das Linienintegral der magnetischen Feldstärke:

$$\oint H \, dl = I \quad (1)$$

Wenn mehrere Ströme von dem Integrationsweg umfasst werden, dann ist das Linienintegral der magnetischen Feldstärke gleich die Summe der Ströme. Die Summe der Ströme, die auch auf einem geschlossenen Weg befinden, wird auch als Durchflutung θ bezeichnet. Im Fall einer Spule mit n Windungen ist die Durchflutung gleich dem Produkt aus Strom und Windungszahl:

$$\theta = n \cdot I \quad (2)$$

Dabei ergibt sich das gleiche Ergebnis bei einem Stromdurchfluss von 100 A in 10 Windungen oder 1 A in 1000 Windungen.

Bei der Berechnung eines Umlaufintegrals in Gleichung (1) wird der Integrationsweg in einzelne Abschnitte aufgeteilt. Für jeden Abschnitt wird ein einzelnes Linienintegral erhalten. Mithilfe dieses Linienintegrals kann in Analogie zur elektrischen Spannung eine magnetische Spannung V bestimmt werden. Die magnetische Spannung ist der Integralweg über die magnetische Feldstärke zwischen zwei Punkten und wird in folgender Formel ausgedrückt:

$$V_{1,2} = \int_{P_1}^{P_2} H \, dl \quad (3)$$

Die magnetische Flussdichte ist eine weitere Größe zur Beschreibung des magnetischen Feldes. Für den Zusammenhang zwischen der magnetischen Flussdichte B , die auch als magnetische Induktion bezeichnet wird, und der magnetischen Feldstärke gilt:

$$B = \mu \cdot H \quad (4)$$

Dabei ist μ der Proportionalitätsfaktor und wird als Permeabilität bezeichnet. Diese charakterisiert den Einfluss von verschiedenen Materialien auf das magnetische Feld. Der Zusammenhang zwischen B und H wird im allgemeinen Fall durch eine Vektorfunktion mit Angaben der Permeabilitätsabhängigkeit von der Richtung, von dem Ort und von der Feldstärke (Tensor-Größe) beschrieben. Die Permeabilität der anisotropen Stoffe ist von der Richtung des Magnetfeldes abhängig, bei den inhomogenen ist sie von dem Ort des Magnetfeldes abhängig und bei den nichtlinearen Materialien von der Feldstärke des Magnetfeldes.

Die absolute Permeabilität kann mit der relativen Permeabilität μ_r als ein Vielfaches der Induktionskonstanten μ_0 dargestellt werden:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (5)$$

Die Induktionskonstante ist gleich der Permeabilität des Vakuums

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \quad (6)$$

und die relative Permeabilität μ_r ist von dem Material abhängig.

Die einfachste Anordnung mit der ein Magnetfeld erzeugt werden kann, ist ein fließender Strom in einem Draht. Die durch den fließenden Strom entstehenden Magnetfeldlinien schließen in verdichtenden Kreisen den Draht ein. Der Umlaufsinn des Magnetfeldes folgt der Schraubenregel: wird die Schraube mit Rechtsgewinde im Umlaufsinn gedreht, so windet sich die Schraube in die Stromrichtung. Für die Stärke des Magnetfeldes im Abstand r vom Draht gilt:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (7)$$

Je größer der Abstand r ist, desto schwächer das Magnetfeld. Wird der Draht zu einer Spule gewickelt, so werden die Felder der einzelnen Schleifen addiert. Das Ergebnis im Innern der zylindrischen Spule ist ein homogenes Magnetfeld, und seine Stärke kann wie folgt berechnet:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{l} \quad (8)$$

Bei Einsetzung von Gleichung (4) in (8) ergibt:

$$H = \frac{n \cdot I}{l} \quad (9)$$

wobei n die Windungszahl und l die Länge der Spule ist. Die Einsetzung eines ferromagnetischen Materials wie Eisen in der Spule kann das magnetische Feld um bis zu einem Faktor 10000 verstärken. Dadurch können größere Magnetfelder erzeugt werden.

Die Stoffe, deren Permeabilität von der Feldstärke nicht abhängig sind, haben ein lineares Verhalten im Magnetfeld. Die Eisenmaterialien, die in technischen Magnetkreisen eingesetzt werden, zeigen im Gegensatz dazu ein nichtlineares Verhalten. Der Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke und der Flussdichte ist bei diesen Materialien nichtlinear und nicht eindeutig. Die Materialien zeigen ein Hysterese-Verhalten wie in der folgenden Abbildung 2.

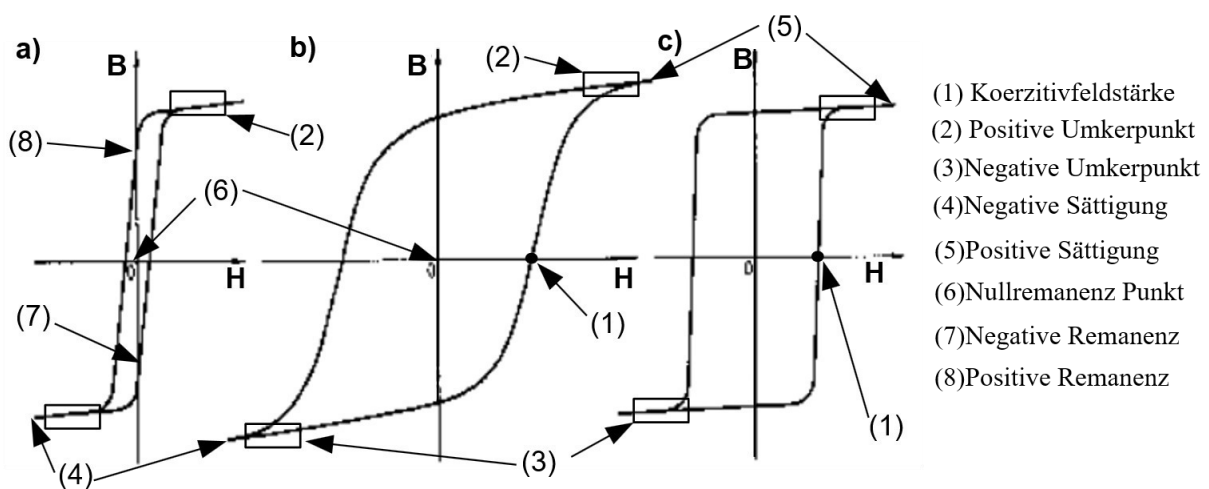


Abbildung 2: Hysteresekurve bei verschiedenen Materialien. a) weichmagnetisches Material kleine Koerzitivfeldstärke $< 1 \text{ kA/m}$; b) hartmagnetisches Material große Koerzitivfeldstärke $> 10 \text{ kA/m}$; c) Rechteck-Hysteresekurve, Remanenzflussdichte \cong Sättigungsflussdichte [5] modifiziert

Die Hysterese eines Materials tritt bei Einwirkung von Magnetfeldern auf. Diese beschreibt den Verlauf der Magnetisierung in einem Material bis zur vollständigen Magnetisierung (Sättigung). Bei Entfernen des Magnetfelds sinkt die Magnetisierung langsam ab. Diese Restmagnetisierung wird als Remanenz bezeichnet.

Für die theoretischen Berechnungen des Spulenaufbaus werden die Gleichungen der magnetischen Feldstärke sowie der Geometrie verwendet. Die Berechnungen werden im nächsten Kapitel 3 beschrieben.

2.2 Magnetismus in der Materie

Die Klassifikation der Magnetwerkstoffe können nach ihrer Permeabilität μ_r (Durchlässigkeit) und ihrer Suszeptibilität χ (Aufnahmefähigkeit) und nach dem molekularen Aufbau in

- 1- diamagnetischen Stoffe
- 2- paramagnetischen Stoffe
- 3- ferromagnetischen Stoffe
- 4- antiferromagnetischen Stoffe und
- 5- ferrimagnetischen Stoffe

eingeteilt werden. Die Permeabilität wird definiert als der Quotient aus der magnetischen Flussdichte B_{Innen} durch die Materie und die magnetische Flussdichte $B_{\text{außen}}$ außerhalb der Materie bei konstanter magnetischer Feldstärke wie in Gleichung (10). Die Suszeptibilität wird definiert als das Produkt der spezifischen magnetischen Suszeptibilität und der Dichte eines Stoffes. Bei den meisten Stoffen ist die Magnetisierung zu der magnetischen Feldstärke bzw. zu der magnetischen Polarisierung proportional [6] [7].

Herleitung der Permeabilität und der Suszeptibilität:

$$B_{\text{innen}} = \mu_r B_{\text{außen}} \Rightarrow \mu_r = \frac{B_{\text{innen}}}{B_{\text{außen}}} \quad (10)$$

$$\text{Magnetische Polarisierung } J \text{ [A/m] im Stoff: } J = B_{\text{innen}} - B_{\text{außen}} \quad (11)$$

$$(10) \text{ In (11) einsetzen: } J = (\mu_r - 1) B_{\text{außen}} \quad (12)$$

$$\text{Da } J \sim B_{\text{außen}} \text{ ist, gilt: } J = \chi \cdot B_{\text{außen}} \quad (13)$$

$$\text{Durch Vergleich von (12) und (13) folgt die Suszeptibilität: } \chi = \mu_r - 1 \quad (14)$$

Außerdem ist auch nach der Größe der Koerzitivfeldstärke eine Einteilung in weich bzw. hartmagnetische Werkstoffe realisierbar. Die Koerzitivfeldstärke ist die Feldstärke, die notwendig ist, einen magnetisierten Stoff wieder vollständig zu entmagnetisieren. Wenn die Koerzitivfeldstärke eines Stoffes eine hohe Zahl besitzt, dann behält er besser seine Magnetisierung [8].

Die Einteilung eines Stoffes wird zuerst nach Permeabilität μ_r und ihrer Suszeptibilität χ vorgenommen. Danach wird nach den magnetischen Eigenschaften der Stoffe wie folgt unterschieden:

$\mu_r < 1$	$\chi < 0$	– diamagnetische Stoffe
$\mu_r > 1$	$\chi > 0$	– para– und antiferromagnetische Stoffe
$\mu_r \gg 1$	$\chi > 0$	– ferro– und ferrimagnetische Stoffe

Wenn die Suszeptibilität eines Stoffes geringfügig negativ ist und ihre Permeabilität wenig kleiner als eins ist, dann wird dies ein **diamagnetischer Stoff** genannt. Diese Stoffe werden im inhomogenen Magnetfeld in Richtung der abnehmenden Feldstärke weggeschoben und sind von der Stärke des magnetisierenden Feldes sowie der Temperatur unabhängig.

Die Einteilung der Stoffe nach ihren magnetischen Eigenschaften kann mithilfe des Atommodells von BOHR betrachtet werden. Die negativ geladenen Elektronen, die sich um den Atomkern auf ihren Bahnen in unterschiedlichen Energieniveaus bewegen, besitzen zusätzlich einen mechanischen Eigendrehimpuls. Aufgrund der Verknüpfung von elektrischem Strom und magnetischer Feldstärke besitzen die Elektronen ein magnetisches Bahnmoment und ein Spinnmoment. Diese magnetischen Momente sind gegen das äußere Magnetfeld gerichtet (Lenz'sche Regel) und rufen eine magnetische Wirkung hervor [6].

Die magnetische Suszeptibilität für dia- und paramagnetische Stoffe sind sehr klein (im Mikro- bzw. in Nanobereich), also im technischen Sinne gelten diese Stoffe als unmagnetisch. Der Magnetismus findet nur bei dem ferri- und ferromagnetischen Stoff. Bei diamagnetischen Stoffen (Cu, Ag, Au, Hg, Pb u.a.) sind alle Spin- und Bahnmomente eines Atoms wechselseitig kompensiert und das magnetische Moment des Atoms ist gleich null. Das kommt bei allen Elementen mit abgeschlossenen bzw. vollbesetzten Schalen vor. Das magnetische Moment eines Atomkerns ist im Vergleich zu den magnetischen Momenten der Elektronen sehr klein, von daher wird diese für die Betrachtung der magnetischen Stoffe vernachlässigt [7] [9].

Bei den **paramagnetischen Stoffen** (Na, K, Mg, Al, Sn, Pt u. a.) haben die Atome bzw. die Moleküle ein permanentes magnetisches Moment. Ohne äußere Magnetfeld heben sich die magnetischen Momente durch die regellose Verteilung der Atome bzw. die Moleküle auf. Wirkt ein Magnetfeld auf einen paramagnetischen Stoff ein, dann werden sie je nach Stärke des magnetischen Feldes gerichtet, sodass ein magnetisches Moment im Stoff resultiert. Eine völlige Ausrichtung der magnetischen Momente wird trotz eines stärksten Magnetfeldes nicht erreicht, da die Spinnmomente der Atome in den paramagnetischen Stoffen von einem oder mehr Elektronen unkompensiert bleiben (z.B. ungerade Elektronenzahlen oder nicht abgeschlossene Elektronenschalen). Die Magnetisierung ist zu der magnetischen Feldstärke proportional und die magnetische Suszeptibilität ist zu der Temperatur umgekehrt proportional. In der Physik werden alle Stoffe, die eine positive magnetische Suszeptibilität besitzen, und ohne magnetische Ordnung auch als paramagnetisch kategorisiert [9] [6].

Die Suszeptibilität von dia- und paramagnetischen Stoffen sind von der Stärke des magnetisierenden Feldes unabhängig und ihre Suszeptibilität ist wenig größer als eins.

Bei den **ferromagnetischen Stoffen** ist die Permeabilität keine Konstante. Sie ist von der Stärke der magnetischen Feldstärke sowie von der Vorbehandlung des Stoffes abhängig. Bei steigender Feldstärke wird bei den ferromagnetischen Stoffen eine Sättigung erreicht, welche bei den paramagnetischen Stoffen nicht realisierbar ist.

Die Eigenschaften der Materiestoffe sind nach dieser Theorie von vier Voraussetzungen beeinflusst:

- 1- Die Vorlage einer Kristallstruktur (Fe: kubisch-raumzentriert; Ni: kubisch-flächenzentriert; Co: hexagonales Gitter).
- 2- Bei Energieniveaus sind die äußeren Elektronenschalen nicht vollbesetzt.
- 3- Die positive Austauschwechselenergie, die sich zwischen atomarer Bindungsenergie befindet.
- 4- Temperaturniveaus (Curie-Temperatur).

Diese genannten Voraussetzungen sind nur für ferromagnetische Elemente (Fe, Co, Ni) gültig. Bei der Aufmagnetisierung dieser Stoffe, werden sie ihre Magnetisierung weitgehend

behalten. Die gemischten Stoffe, die auf diesen Elementen basieren, müssen diese Voraussetzungen nicht mehr erfüllen.

Die Atommomente bei den ferromagnetischen Stoffen sind parallel zueinander ausgerichtet, aber bei den **ferrimagnetischen Stoffen** (z. B. Fe_3O_4 , NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 , $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ oder $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ u. a.) sind die Domänen von Atomabstand zu Elektronenschalenradius aufgrund kleinerer Verhältnisse antiparallel ausgerichtet. Ihre magnetischen Momente sind aufgrund eines unsymmetrischen Gitteraufbaus unterschiedlich groß und deshalb nur teilweise kompensiert. Diese Stoffe verhalten sich wie ein schwacher Ferromagnet. Eine Kompensierung der Atommomente erfolgt, wenn sie gegenseitig ausgerichtet sind [9] [7].

Bei den **antiferromagnetischen Stoffen** (MnO , FeO , CoO , NiO u. a.) ist die mikroskopische Magnetisierung trotz des geordneten magnetischen Zustands ohne äußeres Magnetfeld null.

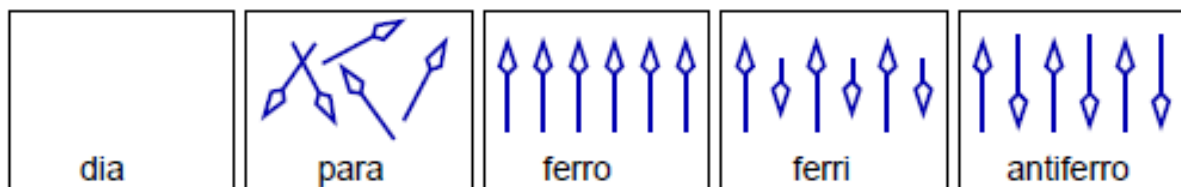


Abbildung 3: Darstellung der Spin-Richtungen in verschiedenen Werkstoffen [10]

Maßgebend für die Einteilung der ferri- und ferromagnetischen Stoffe in hart- und weichmagnetischen Stoffen ist die Koerzitivfeldstärke, wie in Abbildung 2 gezeigt.

Bei weichmagnetischen Stoffen ist die Koerzitivfeldstärke kleiner als 1000 A/m und größer 10 kA/m für hartmagnetische Stoffe. Die Stoffe, die eine Koerzitivfeldstärke zwischen $0,5$ und 10 kA/m haben, werden als halbhart magnetische Stoffe bezeichnet.

2.3 Überblick über die Magnetwiderstandseffekte

Als magnetischer Widerstandseffekt wird die Änderung des elektrischen Widerstands bei der Änderung der Richtung des Magnetfeldes, das auf einen Körper einwirkt, bezeichnet. Die Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes auf einen Festkörper führt zu einer Lokalisierung seiner Ladungsträger und verursacht eine Erhöhung bzw. Erniedrigung des elektrischen Widerstands. Daraus folgt ein positiver bzw. negativer Magnetwiderstandseffekt.

Der positive Magnetwiderstand wird durch die Wirkung der Lorentz-Kraft verursacht, die durch das Anlegen eines Magnetfeldes an einem durchflossenen Stromleiter stattfindet. Die negativen Magnetwiderstandseffekte von EMR, AMR, GMR, TMR und CMR sind im allgemeinen für die technischen Anwendungen wesentlich größer als die positiven Magnetwiderstandseffekte wie z. B. der Hall-Effekt.

Der anisotrope Magnetwiderstand (AMR) ist von dem Winkel zwischen Strom- und Magnetisierung-Richtung abhängig. Der Tunnelmagnetwiderstand (TMR) wird durch das spinpolarisierte Tunneln zwischen zwei ferromagnetischen Elektroden, die durch eine dünne isolierende Tunnelbarriere entkoppelt sind, verursacht. Dies ist von der Richtung der Magnetisierung der beiden ferromagnetischen Schichten zueinander abhängig. Die Größe des TMR-Effektes wird von der Größe der Spinpolarisation der Elektroden an der Fermi-Kante bestimmt und ist größer als beim AMR- und GMR-Effekt [11].

Der Magnetwiderstand ist von dem angelegten Magnetfeld abhängig, je nachdem das Magnetfeld transversal (senkrecht) bzw. longitudinal (parallel) ausgerichtet ist. Im Allgemeinen ist der transversale Magnetwiderstand größer als den longitudinalen Widerstand. In den folgenden Abschnitten werden die Magnetwiderstandseffekte von AMR und TMR betrachtet und erläutert. Andere XMR Magnetwiderstandseffekte sind keine Bestandteile dieser Arbeit.

2.4 Das Prinzip und der Aufbau des anisotropen Magnetwiderstands (AMR)

Der anisotropische Magnetwiderstandseffekt (AMR) zeigt sich bei einigen ferromagnetischen Metallen. Eine Anisotropie im Widerstand heißt, dass der Widerstand vom Winkel zwischen Magnetisierungs- und Strom-Richtung abhängig ist. Große AMR-Effekte können erzielt werden, indem eine große Anisotropie zwischen ρ_{\parallel} und ρ_{\perp} erreicht werden. Der anisotropische Widerstand wird wie folgt berechnet:

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta \quad (15)$$

Wobei ρ_{\parallel} der spezifische longitudinale Widerstand parallel zur Magnetisierungsrichtung ist und ρ_{\perp} der spezifische transversale Widerstand senkrecht zur Magnetisierungsrichtung.

Der spezifische Widerstand ρ ist maximal, wenn Strom und Magnetisierungsrichtung parallel sind und wird kleiner, wenn der Strom und Magnetisierungsrichtung senkrecht aufeinander sind.

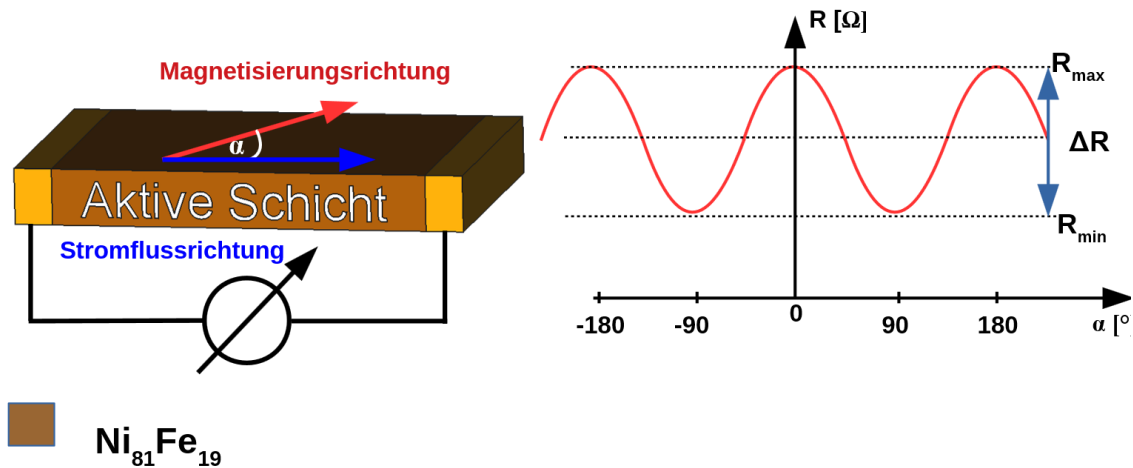


Abbildung 4: Funktionsweise ein AMR-Sensor und seine resultierende Widerstandsänderung

Wenn der Strom wie in Abbildung 4 fließt, kann der spezifische Widerstand ρ durch den Widerstand R ersetzt und der AMR-Effekt durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$R(\alpha) = R_m + \frac{\Delta R}{2} \cos(2\alpha) \tag{16}$$

Der Verlauf der Funktion $R(\alpha)$ für $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Widerstand R ändert sich mit dem doppelten Winkel 2α um einen mittleren Widerstand R_m .

Mithilfe der modernen Fertigungstechniken in der Waferproduktion können der Temperaturkoeffizient für die Ausgangssignalamplitude, der Sensorwiderstand und die Offsetspannung reduziert werden. Für eine weitere Reduzierung der Temperatureinflüsse werden normalerweise vier Widerstände zu einer Wheatstone'schen Brücke verschaltet. Die Wheatstone'sche Brücken im AMR-Sensor sind so gebaut, dass sie um 45° zueinander gedreht sind. Eine Brücke erzeugt ein Sinus- und die andere ein Kosinus-Signal. Jede Wheatstone'sche Brücke besteht aus mäanderförmigen Widerstandsböcken, die auf das einwirkende Magnetfeld mit einer reversierenden Änderung reagieren. Abbildung 5 zeigt die Signalkette eines AMR-Sensors.

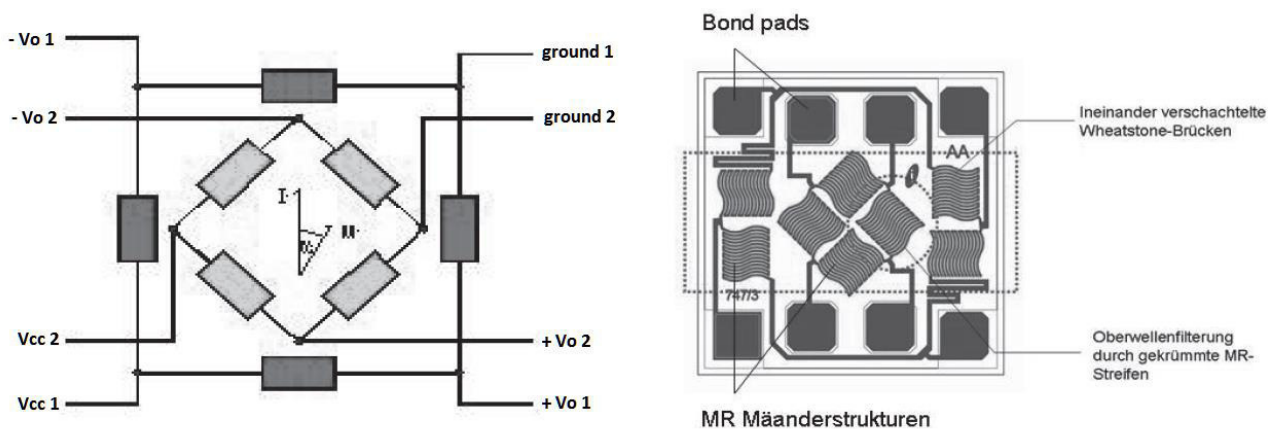


Abbildung 5: Strukturaufbau eines AMR-Winkelsensors [8] modifiziert.

Wenn der AMR-Sensor unter einem äußeren drehenden Magnetfeld betrieben wird, werden in der gleichen Ebene wie die Wheatstone'sche Brücke zwei Ausgangssignale, die die doppelte Frequenz des Winkels α zwischen dem Sensor und dem Magnetfeld besitzen, erzeugt. Ein Ausgangssignal repräsentiert die $\sin(2\alpha)$ Funktion und dem anderen Ausgangssignal die $\cos(2\alpha)$ Funktion. Mit dieser Signalform kann die absolute Messung der Winkel bis 180° mithilfe der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2 = 1 \tag{17}$$

Auch erlaubt diese Gleichung eine Selbstdiagnose in sicherheitskritischen Anwendungen absolut zu berechnen. Ein AMR-Sensor wird aufgrund des schwachen Ausgangssignals häufig mit integrierter Verstärkerschaltung eingesetzt oder mit äußerer Verstärkerschaltung.

2.5 Das Prinzip und die Eigenschaften des Tunnelmagnetwiderstands (TMR)

Tunnelmagnetwiderstand (TMR) in Englisch (tunneling magnetoresistance) wird die Änderung des elektrischen Widerstandes in Systemen vom Typ Ferromagnet/ Isolator/ Ferromagnet (FM/I/FM) in Abhängigkeit von der Magnetfeldrichtung bezeichnet.

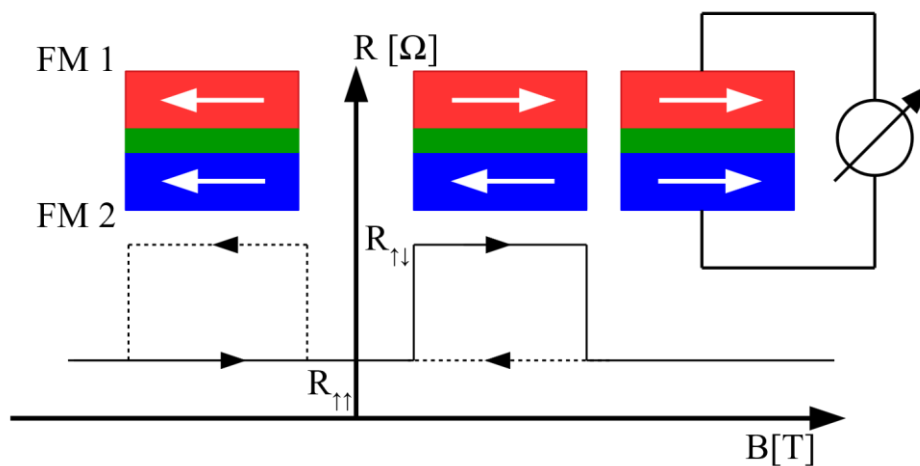


Abbildung 6: Funktionsprinzip des TMR-Effekts

Ein hoher elektrischer Widerstand kann durch eine antiparallele Magnetisierung der beiden ferromagnetischen Schichten erzielt und für einen niedrigen elektrischen Widerstand durch die parallele Magnetisierung der beiden Schichten erreicht werden. Die Definition lautet:

$$TMR[\%] = \frac{R_{antiparallel} - R_{parallel}}{R_{parallel}} \tag{18}$$

Eine antiparallele Magnetisierung kann erreicht werden, indem die Schichten mit unterschiedlichen Schaltfeldstärken benutzt werden. Diese kann durch die Verwendung von weich- und magnetischen Materialien oder durch die Fixierung einer der ferromagnetischen Schichten durch eine antiferromagnetische Schicht erreicht werden [12].

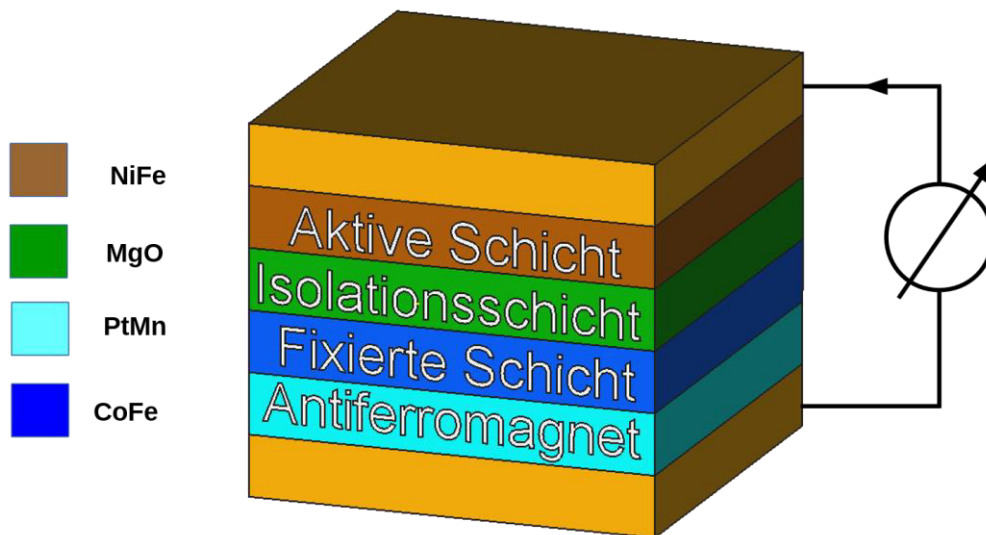


Abbildung 7: Aufbau des magnetoresistiven TMR-Effekts

Der TMR-Sensor in Abbildung 7 besteht aus zwei ferromagnetischen Schichten wie z. B. Co_2Fe (Eisen-Kohlendioxid) oder NiFe (Nickel-Eisen). Zwischen den ferromagnetischen Schichten befindet sich eine Isolationsschicht aus Al_2O_3 (Aluminiumoxid) bzw. MgO (Magnesiumoxid). Unten liegt eine Schicht aus einem antiferromagnetischen Werkstoff, wie z. B. IrMn (Iridium-Mangan) bzw. PtMn (Platin-Mangan). Diese Schicht dient zum Fixieren der Magnetisierung der unteren Schicht. Die obere Schicht soll dem äußeren magnetischen Feld folgen.

Die Elektronen können durch die dünne Isolationsschicht (Nanometer Bereich) tunneln. Der Widerstand ist am kleinsten bei paralleler Ausrichtung und am größten bei antiparalleler Ausrichtung. Ein entscheidender Unterschied zum GMR-Effekt ist, dass der Strom in vertikaler Richtung von der einen Schicht in die andere fließt.

Die erreichbare Widerstandsänderung ist wesentlich größer als bei GMR. Dies kann bei tiefen Temperaturen bis zu 1000 % und bei Raumtemperatur bis auf etwa 40 % bis 200 % erreicht werden. Diese Widerstandsänderung führt zu einer hohen Signalamplitude, sodass eine Nachverstärkerschaltung nicht nötig ist. Man kann den Grundwiderstand innerhalb von weiten Grenzen von einigen Ohm bis einigen Mega-Ohm variieren. Die Variation kann über die Fläche des Sensorelements bzw. über Isolator-Dicke verarbeitet werden [13].

2.6 Aufbau und Funktionsweise des TMR-Sensors

Die Verwendung von TMR-Sensoren bietet viele Vorteile. Ein Vorteil davon ist das große MR-Verhältnis bei dem TMR-Sensor. Dies hat ein sehr hohes Ausgangssignal zur Folge gegenüber allen anderen magnetischen Winkelsensoren (GMR und AMR). Der Aufbau eines TMR-Sensors beinhaltet eine Spin-Ventil-Struktur, siehe Abbildung 8. Diese besteht aus drei übereinander liegenden Schichten. Die erste Schicht von oben wird als die Magnetisierungsschicht bezeichnet und sie ist von der Richtung der Magnetisierung abhängig. Im Gegensatz dazu hat die fixierte Schicht, die sich ganz unten befindet, eine feste

Vorzugsrichtung der Magnetisierung. Zwischen den beiden Schichten liegt eine Barrierschicht, die die beiden ferromagnetischen Schichten voneinander isoliert und dadurch die Elektronen tunneln können.

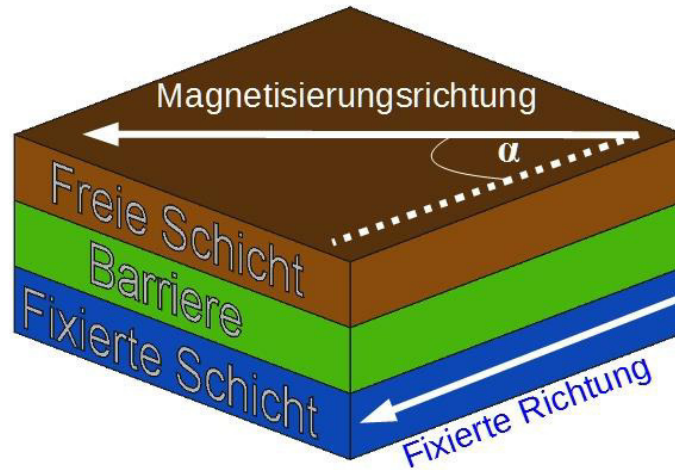


Abbildung 8: Strukturkonzept des TMR-Effekts

Der Brückenaufbau in TDK- und NVE-Winkelsensoren sind unterschiedlich. Ein TDK-Winkelsensor besteht aus zwei Vollbrücken, wie Abbildung 10 zeigt. Beim NVE besteht der Aufbau aus zwei Halbbrücken, siehe Abbildung 9.

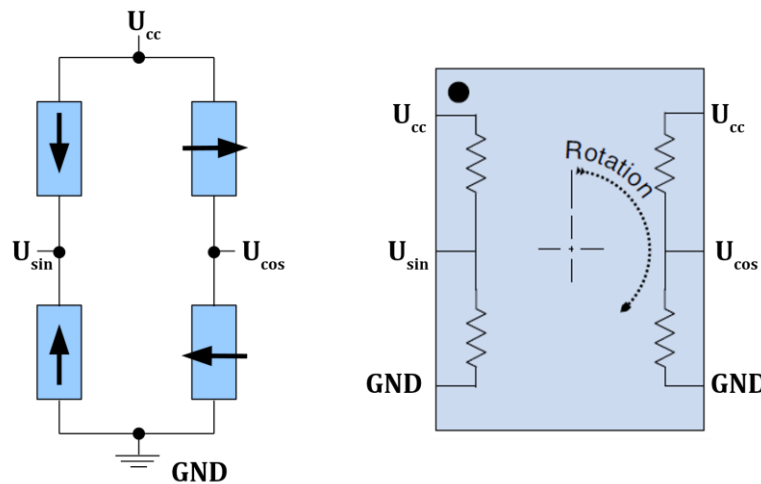


Abbildung 9: 2 Wheatstone'schen-Halbbrücken [14] modifiziert

Für Ausgangssignale der Sinus- und Kosinusspannungen gilt:

$$U_{sin} = U_{CC} \cdot \left(\frac{U_{sin-Max} - U_{sin-Min}}{2} \right) \sin(\alpha) + \frac{U_{CC}}{2} + U_{offset-sin} \quad (19)$$

$$U_{cos} = U_{CC} \cdot \left(\frac{U_{cos-Max} - U_{cos-Min}}{2} \right) \cos(\alpha) + \frac{U_{CC}}{2} + U_{offset-cos} \quad (20)$$

Wobei sind U_{sin} und U_{cos} die Ausgangssignale des Sensors, U_{cc} die Versorgungsspannungen, $U_{cos-Max}$, $U_{cos-Min}$, $U_{sin-Max}$ und $U_{sin-Min}$ die Sensorausgangsspitzenignalpegel, und $U_{offset-sin}$ und $U_{offset-cos}$ die Sensor Offset Spannungen [14].

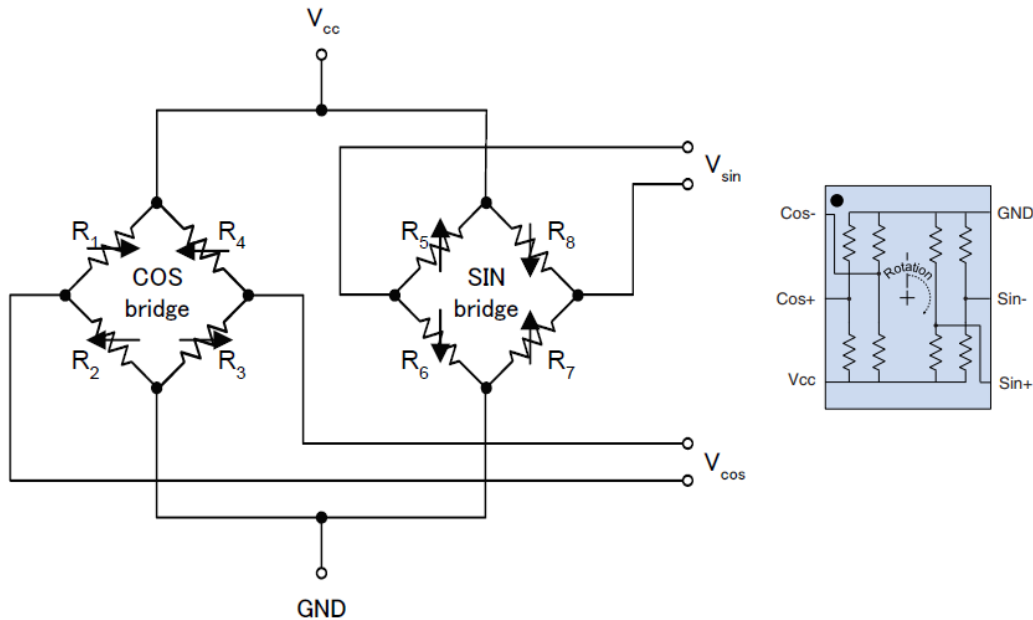


Abbildung 10: 2 Wheatstone'schen-Vollbrücken [15] modifiziert

Wie man aus den zwei Abbildungen 9 und 10 erkennt, bestehen die Schaltungen aus zwei Wheatstone'schen-Brücken, welche in ihrer Richtung gegenseitig orthogonal zu der fixierten Schicht sind. Das Kosinus-Signal wird von der Cos-Brücke und das Sinus-Signal von der Sin-Brücke erzeugt. Die Pfeile an den Widerständen zeigen die Richtung der Magnetisierung der fixierten Schicht an. Für R_1 und R_2 und auch für R_3 und R_4 ist die Richtung der Magnetisierung der fixierten Schicht zueinander antiparallel. $U_{cos}(\alpha)$ und $U_{sin}(\alpha)$ werden von der Cos- bzw. Sin-Brücke erzeugt und der Winkel α wird durch den Arkustangens des Verhältnisses der beiden Spannungen gerechnet:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{U_{sin}}{U_{cos}}\right) \tag{21}$$

$$U_{cos} = U_{cc} \cdot \left(\frac{R_3(\alpha)}{R_3(\alpha) + R_4(\alpha)} - \frac{R_2(\alpha)}{R_2(\alpha) + R_1(\alpha)} \right) \tag{22}$$

$$U_{sin} = U_{cc} \cdot \left(\frac{R_7(\alpha)}{R_7(\alpha) + R_8(\alpha)} - \frac{R_6(\alpha)}{R_5(\alpha) + R_6(\alpha)} \right) \tag{23}$$

Wobei ist U_{cc} die angelegte Spannung an den Brücken ist, R_1 bis R_4 sind die Widerstände der Cos-Brücke, R_5 bis R_8 die Widerstände der Sin-Brücke und α der Winkel zwischen der Magnetisierung der fixierten Schicht und der Magnetisierung der freien Schicht. Die Funktionen können auch für die Temperaturmessung angewendet werden.

2.7 Vergleich der magnetischen Winkelsensoren AMR und TMR

Die Winkelsensoren TMR und AMR unterscheiden sich in verschiedenen Aspekten. Ein elementarer Unterschied ist der Zusammenhang zwischen dem Sensorwiderstand und der Sensorfläche. Der Widerstand eines TMR-Winkelsensors ist durch die Schichtdicke bzw. dem Flächenwiderstand der Barriere definiert. Ein normaler Flächenwiderstand einer Al_2O_3 -Barriere (Aluminiumoxid) liegt bei $10 \text{ M}\Omega$ pro μm^2 Fläche. Wird eine Tunnelbarriere von $100 \mu\text{m}^2$ Fläche vorgesehen, dann ergibt sich ein Widerstand von $100 \text{ M}\Omega$ eines einzelnen Tunnelelements. Im Gegensatz zu AMR-Winkelsensoren gilt, je kleiner die Sensorfläche, desto größer sein Widerstand wird. Eine kleinere Tunnelfläche führt zu einem großen Widerstand.

Der Leistungsverbrauch eines TMR-Winkelsensors fällt um einen Faktor 100 bis 1000 geringer aus. Die Leistungsaufnahmeanforderung eines TMR-Winkelsensors ist gering. Er kann beispielweise im Batteriebetrieb für lange Zeit arbeiten [16].

Ein ganz wesentlicher Unterschied zwischen TMR- und AMR-Sensoren ist das Verhalten im Drehfeld. Bei einem AMR-Winkelsensor wird bei einer Drehung der Magnetisierungsrichtung um 90° von parallel auf senkrecht zur Stromrichtung der komplette Magnetwiderstandshub erreicht und bei 180° stellt sich der Ausgangszustand wieder ein, d. h. eine Periode von 180° . Im Gegensatz zum TMR-Winkelsensor wird der Ausgangszustand erst bei einer vollen Umdrehung von 360° wiedererreicht, somit eine Periodizität von 360° .

Ein wichtiger Vorteil weist der TMR- gegenüber dem AMR-Winkelsensor bei Messungen auf, sein Ausgangssignal ist deutlich größer als beim AMR-Sensor. Beim AMR-Sensor muss der das Ausgangssignal mithilfe einer elektronischen Schaltung verstärkt werden, um es genauer verarbeiten zu können.

Der Einfluss der Hysterese des TMR-Winkelsensor ist sehr gering und der Winkelfehler beträgt $0,1$ Grad. Auch ein Test für den Frequenzgang des Winkelfehlers wurde durchgeführt. Der Winkelfehler erhöht sich um etwa $0,2$ Grad bei hoher bzw. niedriger Temperatur [15].

Der Winkelsensor wird kaputt bei einem elektrischen Durchbruch der TMR-Sperrschicht. Dieser wird im Allgemeinen hauptsächlich durch Nadelloch-Erweiterungen verursacht, wo sich die Nadellöcher in der Oxidfilm-Barriere allmählich vergrößern. Die Lebensdauer der Barrierschicht laut einer Berechnung kann bis $6 \cdot 10^6$ Jahre dauert, bis sich der Widerstand um 1% unter den Bedingungen von 5V Versorgungsspannung und 150 Grad Celsius verringern [15]. Die TMR-Barrierschicht weist somit eine lange Lebensdauer und ausreichende Zuverlässigkeit auf.

Ein allgemeiner Vergleich zwischen dem TMR- und AMR-Winkelsensor sowie der betrachtenden Winkelsensoren werden in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Vergleich zwischen AMR- und TMR-Technologie [16] [17]

	AMR	TMR
Entdeckung	1857	1994
$\Delta R/R$	0	++
Empfindlichkeit	+	+
Signal/Rauschen	++	0
Bandbreite	++	+
Leistungsaufnahme	0	++
Temperaturstabilität	+	++
Hysterese	++	0
Strahlungsresistenz	+	+
Miniaturisierbarkeit	0	++
Genauigkeit	++	++
Empfindlichkeit	++	++
Robustheit	++	+
Temperaturstabilität	+	++
Integrationsfähigkeit	+	++
Kosten	+	0
Physikalisches Wirkprinzip	Anisotroper Streuquerschnitt im Volumen	Spinabhängiges Tunneln durch Isolationsschicht
erste technische Anwendungen	erste Vorschläge im Jahr 1971, in Leseköpfen seit 1990	erste Vorschläge 1995

Tabelle 2: Spezifikation der betrachteten Winkelsensoren [14] [18] [19]

Firma	NXP		NVE		TDK	
Wandler-Effekt	AMR		TMR		TMR	
Sensor-Typennummer	KMZ60		AAT001-10E		TAS2141-AAAB	
	min	max	min	max	min	max
U_{CC} (Versorgungsspannung) [V]	+2,7	+5,5	-	+7	+3	+5,5
U_{PP} (Spitze-Spitze-Wert) [mV/V]	+0,46 V_{CC}	+0,7 V_{CC}	+130	-	+540	+670
Offsetspannungen [mV/V] bei 25 °C	-0,08 V_{CC}	+0,08 V_{CC}	-10	+10	-5	+5
Magnetische Feldstärke [kA/m]	25	-	2,39	15,92	-	63.662,00
Brückenwiderstand [k Ω]	-	5	-	1250	4	6
Betriebstemperatur [°C]	-40	150	-40	125	-40	150

3 Kreuzspulenmessplatz zur Sensorcharakterisierung

In diesem Kapitel werden die Softwareinstallation sowie die Steuerung der verwendeten Geräte in der Messschaltung erläutert. Danach werden der Aufbau und die Funktionsweise des Kreuzspulenmessplatzes beschrieben. Im Laufe des Kapitels werden der Entwurf und die Konstruktion einer neuen Kreuzluftspule sowie die Ermittlung des Spulenfaktors veranschaulicht. Das Konzept des Kreuzspulenmessplatzes wurde von Zippel [2] und Siebenmorgen [1] vorgestellt und soll in dieser Arbeit aufgegriffen und auf Winkelsensoren angepasst werden.

3.1 Softwaresteuerung von Oszilloskop und Funktionsgenerator

Vor der Vermessung der Sensoren ist die Verbindung und Steuerung des Oszilloskops und des Funktionsgenerators zu realisieren. Nebenbei sollen auch die MATLAB-Skripte der vergangenen Abschlussarbeiten für die Verbindung und Steuerung bearbeitet und angepasst werden.

Zuerst wurde verschiedene Software, wie MATLAB, VISA-Driver und Measurement & Automation Explorer, die sich auf der National Instrument Seite befinden, heruntergeladen. Außerdem muss auch der MATLAB Instrument-Driver, der sich in der Seite „<https://de.tek.com/>“ befindet, heruntergeladen werden. Die VISA Software (Virtual instrument software architecture) bietet die Möglichkeit, die Geräte mit LAN oder USB zu verbinden. Hier werden die Geräte über die USB-Schnittstelle angesteuert. Der Vorteil bei einer USB-Verbindung ist die deutlich höhere Geschwindigkeit im Vergleich mit der Ethernet-Verbindung (CAT4). Die Geschwindigkeit von USB 2.0 beträgt 480 MBit/s. Sie ist fast fünfmal schneller als beim Ethernet-Kabel mit der Geschwindigkeit von 100 MBit/s. Nach der erfolgreichen Softwareinstallation im PC soll auch der MATLAB Instrument-Driver von Tektronix mithilfe eines Befehls im Kommandofenster von MATLAB installiert werden. Für den Verbindungsaufbau sind folgende Schritte durchzuführen:

- 1- Der Befehl ‚makemid‘ wandelt die gegebenen Driver zu MATLAB Instrument Driver in dem gegebenen Verzeichnis um.

```
makemid('tkdpo4k','C:\ProgramFiles\MATLAB\R2017b\toolbox\instrument\instrument\drivers\tektronix_tds3034B.mdd')
```

- 2- Durch Test & Measurement im MATLAB-Tool kann die Installation des Gerätedrivers geprüft werden, indem sich der Driver im Instrument-Drivers-Baum befindet, oder durch die Eingabe des MATLAB-Befehls ‚instrhwinfo‘ im Kommandofenster. Dieser Befehl gibt die Hardware-Informationen zu dem gefundenen Gerät aus:

```
vhwinfo = instrhwinfo('visa','tek')
```

- 3- Ein VISA-Objekt kann durch folgenden Befehl erstellt werden, wenn das Gerät erfolgreich auf dem PC definiert ist:


```
interfaceObj=visa('ni','USB::0x0699::0x0423::C010367::INSTR');
```

Wobei 'ni' für National Instrument steht und nach USB steht die Manufacturer-ID, der Model-Code und die Serial-Number.

- 4- Mithilfe des Befehles ‚connect‘ kann das Gerät mit dem PC verbunden werden.

```
connect('USB0::0x0699::0x0423::C010087::INSTR')
```

Nach der erfolgreichen Definition und Verbindung des Gerätes soll nun eine Funktion geschrieben und mit MATLAB Code implementiert werden. Diese Funktion wird innerhalb der Durchführung des Aufnahmeprogramms aufgerufen und durchgeführt.

```
function [y,y1] = connect_scope()
interfaceObj = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',...
    |'USB0::0x0699::0x0423::C010087::0::INSTR', 'Tag', '');
% Create the VISA-USB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = visa('tek', 'USB0::0x0699::0x0423::C010087::0::INSTR');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end
% Create a device object.
y1 = icdevice('dpo4054.mdd_s', interfaceObj);
y = interfaceObj;
connect(y1)
end
```

Abbildung 11: Implementierte Oszilloskop-Aufruffunktion in MATLAB-Code

- 5- Die Instrument-Driver, die in MATLAB Instrument-Driver installiert sind, sollen auch während des Funktionsaufrufs angegeben werden, um die Einstellungen an den verbundenen Geräten zu übertragen:

```
y1 = icdevice('dpo4054.mdd_s', interfaceObj);
```

Dieser Driver enthält die Eigenschaften bzw. Einstellungen, die das Gerät übernehmen soll.

Nun sollen die Einstellungen von MATLAB zu den verbundenen Geräten übertragen werden. Man kann zu den Einstellungen im Test & Measurement-Tool unter Device Object, die unter Instrument-Objects befindet, gelangen. Unter ‚Functions‘ und ‚Properties‘ kann die gewünschte Einstellung ausgewählt und durch die Taste Execute bzw. Get & Set ausgeführt werden. Die Codedarstellung der Funktion kann in „Session-Log“ gefunden werden. Die Eigenschaften bzw. der Einstellungen des Instruments sind vom installierten MATLAB-Driver abhängig. Im Aufnahme-Skript wurden die Einstellungen Acquisition, ‚Waveform‘ sowie die Skalierung für alle benutzten Kanäle im Oszilloskop verwendet. Für den Funktionsgenerator wurden die

Eigenschaften „Amplitudenmodulation“, „Frequenz“, „Spannung“ und „Wellenform“ verwendet.

alle benutzten Kanäle im Oszilloskop verwendet. Für den Funktionsgenerator wurden die Eigenschaften Amplitudenmodulation, Frequenz, Spannung und Wellenform verwendet.

6- Die Geräteinstellungen sind in den Funktionen

„scope_settings_method_1“ und „funcgen_settings_method_1“

gespeichert. Der Betriebszustand (ON & OFF) der beiden Kanäle des Funktionsgenerators wird ebenfalls mit MATLAB gesteuert.

3.2 Aufbau und Funktionsweise der Kreuzspulenmessplatz

In diesem Abschnitt werden der Aufbau und die Funktionsweise des Kreuzspulenmessplatzes zur Vermessung und Charakterisierung der Winkelsensoren erläutert. Die gesamte Darstellung des Messplatzes ist in den Abbildungen 12 und 13 zu sehen. Dabei zeigt Abbildung 12 den Messschaltungsaufbau und Abbildung 13 eine Fotografie der Schaltung und der verwendeten Geräte.

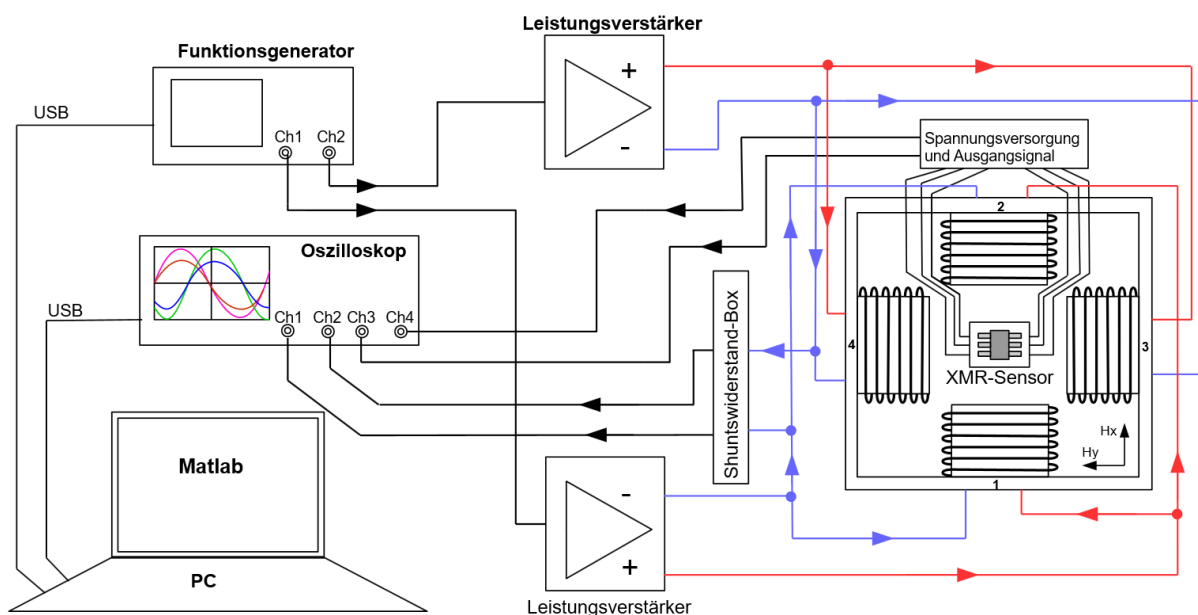


Abbildung 12: Aufbau des Kreuzspulenmessplatzes zur Vermessung von 2D-Magnetischen Sensoren nach Riemschneider und Krey [3]

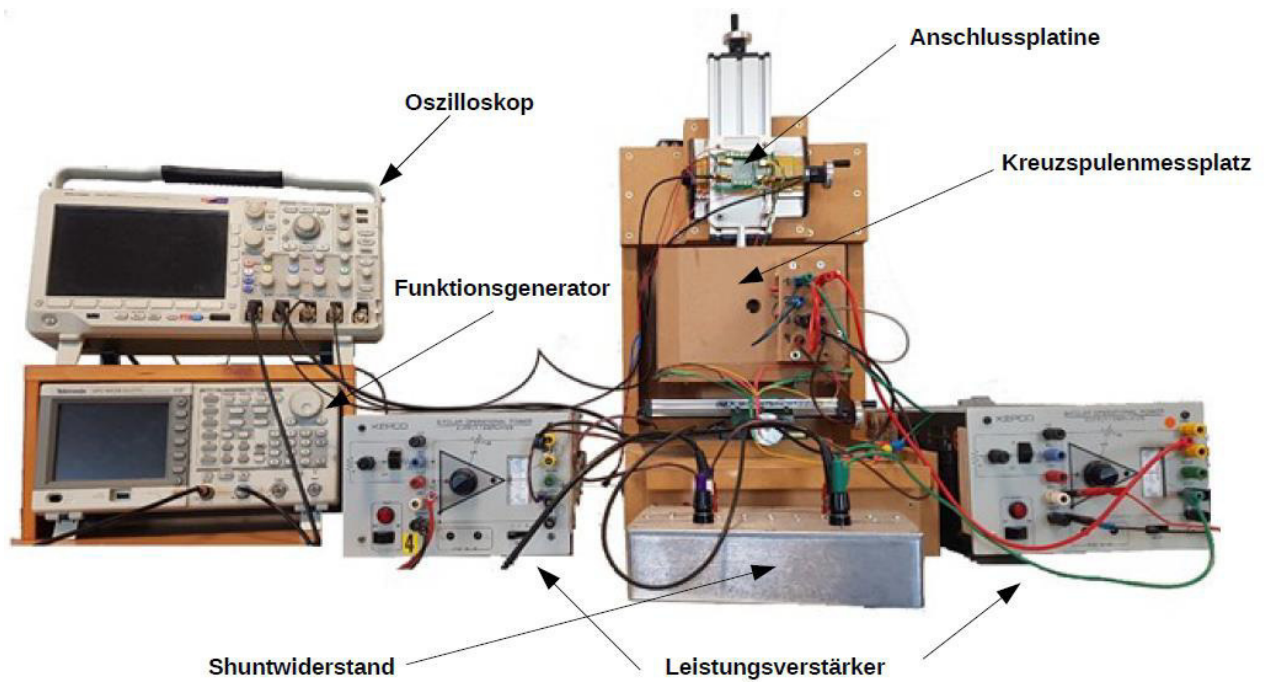


Abbildung 13: Der Messplatz und die verwendeten Geräte

Durch den Ausführungsbefehl in MATLAB werden die Einstellungen der Signale für den Funktionsgenerator gesendet. Die erzeugten Signale aus dem Funktionsgenerator werden durch zwei Leistungsoperationsverstärker verstärkt, um hohe Ströme zu erzeugen. Durch den Stromfluss entsteht in den Spulen ein Magnetfeld, das den magnetischen Winkelsensor anregt. Die Ströme zu den Spulen werden über einen Shuntwiderstand und die Ausgangssignale der Sensoren direkt mit einem 4-Kanal Oszilloskop gemessen und in mittels MATLAB gespeichert. Das Magnetfeld enthält zwei Feldkomponenten (H_x und H_y). Jedes Spulenpaar stellt die X- bzw. Y-Komponente dar. Die Spulenpaare sollen gegenseitig arbeiten und ein möglichst homogenes magnetisches Feld aufbauen. Die Spulen sind parallelgeschaltet und der Strom verteilt sich gleichmäßig auf das Spulenpaar. Das Prinzip des Aufbaus der Spulen folgt nach Helmholtz. Für ein Helmholtzspulenpaar werden zwei gleichförmige Spulen mit einem gleichen Radius R im Abstand R voneinander aufgestellt, siehe Abbildung 13.

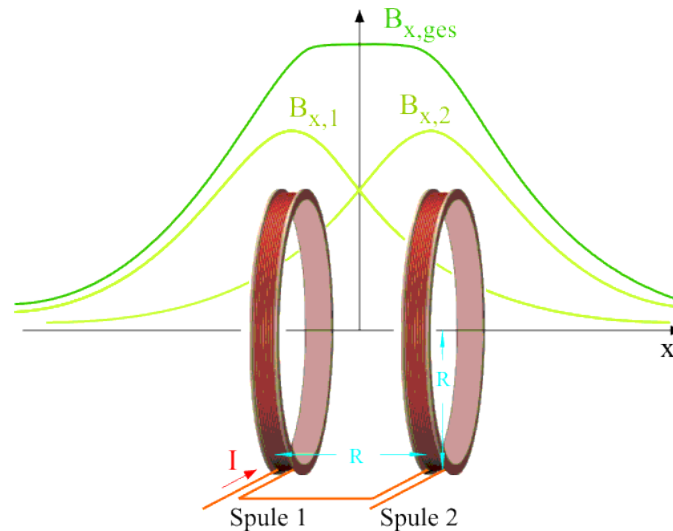


Abbildung 14: Funktionsprinzip der Helmholtz-Spule [20]

Das erzeugte Magnetfeld in X-Richtung wird H_x und in Y-Richtung H_y genannt. Die Spulenpaare im Kreuzspulenmessplatz können in Reihen- oder Parallelschaltung betrieben werden. Die Spulenpaare sind um 90° voneinander gedreht. Die betrachteten Winkelsensoren verfügen über Magnetwiderstandseffekte (TMR & AMR). Das bedeutet, dass die Sensoren ihre Widerstände in Abhängigkeit vom Magnetfeld ändern, wie in Kapitel 2 beschrieben wurde. Der Winkelsensor muss genau in der Mitte der Spulen platziert werden und mit einer Konstantspannungsquelle bzw. Batterien versorgt. Um mehr Präzision bei der Sensorplatzierung zu erhalten, kann die Platzierung mit dem verbauten roten Kreuzlicht, das sich genau in der Mitte des Eisenspulenkastens befindet, kontrolliert und angepasst werden. Dieses dient zur Festlegung des Mittelpunkts des Winkelsensors im Messraum.

Die angezeigten Daten auf dem Oszilloskop werden durch MATLAB ausgelesen, gespeichert und schließlich, weiterbearbeitet, um das Kennfeld darzustellen.

Eine Platine mit passenden Anschlüssen soll für alle Winkelsensortypen gebaut werden, wie in Abbildung 14 gezeigt. Mit der Platine können bis zu vier Ausgangssignale des Sensors mit dem Oszilloskop verbunden werden. Zudem ist eine getrennte Spannungsversorgung von zwei Vollbrücken möglich.

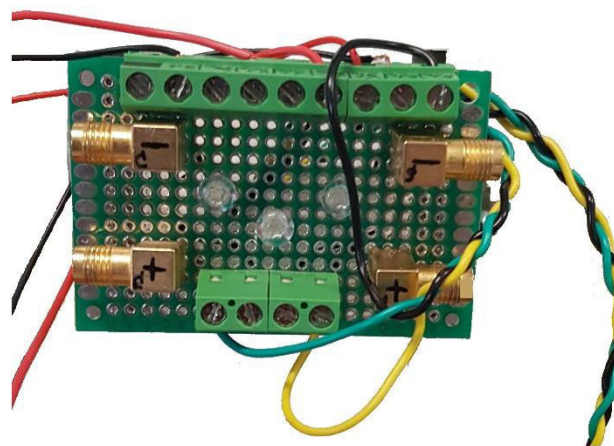


Abbildung 15: Anschlussplatine zum Verbinden der Winkelsensoren

Für die Messschaltung werden drei Betriebsspannungen benötigt, 12 V für die Lüfter an dem Spulenkasten, damit die entstehende Wärme durch den Strom abgesenkt werden kann. Auch die Winkelsensoren benötigen einer Betriebsspannung, die von Batterien bzw. von einem Labornetzgerät bereitgestellt wird.

Um die Signalamplitude zu erhalten, werden die Ausgangssignale des Funktionsgenerators verstärkt. Dafür werden zwei Leistungsoperationsverstärker benutzt. Die beiden Verstärker, der Firma KEPCO werden, gegensinnig arbeiten. Das heißt während ein Leistungsverstärker eine positive Spannung ausgibt, gibt der andere eine negative Spannung aus. Wichtig ist, dass die beiden Leistungsoperationsverstärker entfernt voneinander aufgestellt werden, um störungsfreie Signale zu bekommen.

3.3 Anforderungen und Vorgehensweise

Das Labor verfügt über vier Kreuzspulenmessplätze, die von Siebenmorgen [1] und Zippel [2] gebaut wurden. In der folgenden Tabelle sind alle bestehenden Messplätze mit ihren Eigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht der verfügbaren Spulenkästen

Kreuzspulenmessplatz	Spulenfaktor [1/m]	Messraum [mm x mm]	Max Feldstärke im Dauerbetrieb* [kA/m]
Klein-Feld-Kasten (Luftspule)	1825...1825	58 x 58	± 3,8
Mittel-Feld-Kasten (Eisenkern)	7705...7736	46 x 46	± 9
Groß-Feld-Kasten (Eisenkern)	17145...17619	34 x 34	± 22
Eisen-Messplatz (Elektroblechkern)	20617	36 x 36	± 50

*Im Dauerbetrieb bedeutet, dass sich an den Spulen ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat. Mit aktvierten Lüfter werden die Werte ermittelt [3].

Der Spulenfaktor ist der Quotient aus der magnetischen Feldstärke und dem geflossenen Strom. Er beschreibt, wie stark das Magnetfeld im Zentrum des Messplatzes. Dieser ist wichtig, wenn keine Informationen über die Windungszahl der Spule vorhanden sind. Die Formel für den Spulenfaktor lautet:

$$I_{\text{fließende Strom}} = \frac{H_{\text{gewünscht}}}{\text{Spulenfaktor}} \quad (24)$$

Der Spulenfaktor wird mit dem Gauss-Teslameter Typ FH-55, der Firma MAGNET-PHYSIK automatisiert gemessen.

In dieser Arbeit werden die Kennfelder sowie die Kennlinien mithilfe des Eisenkernmessplatzes dargestellt. Um die Hysterese des getesteten Winkelsensors darzustellen, soll ein neuer Luft-Messplatz entworfen und gebaut werden.

Um eine stärkere magnetische Feldstärke zu erzeugen, soll der neue Luft-Messplatz folgende grundsätzlichen Anforderungen erfüllen. Diese Anforderungen basieren auf den Grundlagen, die in Kapitel 2 beschrieben:

- Die Länge des Wickelkörpers soll möglichst klein sein, da die magnetische Feldstärke nicht proportional mit der Länge einer Spule ist.
- Das Magnetfeld im Messraum des Winkelsensors soll in einem Bereich von $32 \times 32 \text{ mm}^2$ möglichst homogen sein.
- Die Windungszahl des Spulenkörpers soll möglichst groß sein, da die Windungszahl proportional zur magnetischen Feldstärke ist und eine stärkere magnetische Feldstärke mit einem geringeren Strom ermöglichen kann.
- Die Stromrichtung für jede Spule soll frei wählbar sein, um die in Reihen- oder Parallelschaltung zu verbinden.
- Die Feldstärke soll möglichst bis zu $\pm 20 \text{ kA/m}$ betragen.
- Mehrere Lüfter sollen an dem Messplatz angebaut werden, damit die entstehende Wärme schnell abgeführt werden kann.

Vor dem Entwurf eines neuen Luft-Messplatzes werden die Angaben der Spulen berechnet und mit einem geeigneten Programm simuliert. Die Berechnungen können in Excel durchgeführt werden. Wichtig bei der Berechnung sind die Angaben des Spulenkörpers, der Leistung, des Spulenwiderstands, des Spulenfaktors sowie der Windungszahl. Diese Berechnungen sollen für verschiedene Kupferdrahtdurchmesser durchgeführt werden, um einen geeigneten Kupferdraht auszuwählen. Nach der Berechnung kommt das Programm FEMM (Finite Element Method Magnetics) für die Magnetfeldsimulation zum Einsatz. Dieses Programm ist lizenzfrei und kann niederfrequente elektromagnetische Probleme auf zweidimensionalen planaren und axialsymmetrischen Domänen lösen. In diesem Programm kann eine Spule mit ihren Geometriedaten erstellt und der Kupferdrahttyp sowie Spulenkörpertyp von dem Menü des Programms ausgewählt werden. Wenn die Simulationsergebnisse mit der Berechnung übereinstimmen, kann das Modell konstruiert und erstellt werden. Für die Konstruktion der Spule wird FreeCAD verwendet. Danach wird das Modell gefertigt. Eine ausführliche Beschreibung der Konstruktion und Entwicklung werden im nächsten Abschnitt erläutert.

3.4 Planung und Konstruktion der neuen Luftkreuzspule

Für eine neue Konstruktion eines Messplatzes wäre es günstig, wenn dieser mit den hauseigenen und damit preisgünstigen Mitteln erstellt wird. Hier kommt die Idee der Konstruktion durch FreeCAD und die Verwendung eines 3D-Druckers zum Einsatz. Als Anregung dafür dient den Aufbau von verschiedenen Kreuzspulen, die von Siebenmorgen [1] erstellt wurden. Der Klein-Feld-Kasten von Siebenmorgen kann eine bis maximal $\pm 3,8 \text{ kA/m}$ homogene magnetische Feldstärke im Mittelpunkt zwischen einem Spulenpaar bei einem 5 A Stromfluss erzeugen. Allerdings könnte der geforderte Wert der magnetischen Feldstärke $\pm 20 \text{ kA/m}$ erreicht werden, indem ein Leistungsverstärker mit einem Strom größer als von $\pm 20 \text{ A}$ verwendet wird. Da die Ausstattung der HAW keinen Leistungsverstärker mit dieser Eigenschaft hat und aufgrund der Zerstörung der Luftspulenkasten zu vermeiden, wird ein

neuer Luft-Messplatz gebaut. Für die Darstellung der Hysterese des TMR-Winkelsensors wird eine magnetische Feldstärke von ± 12 bis ± 20 kA/m benötigt.

Es ist auch notwendig, einen passenden Kupferdraht für die Wicklung zu wählen. Die wichtigsten Kriterien bei der Auswahl sind der maximal zulässige Strom und ein möglichst geringer Widerstand. Als Stromquelle kommen zwei Leistungsverstärker „BIPOLAR OPERATIONAL POWER“ der Firma KEPCO, die einen maximalen linearen Strom von ± 5 A und eine Spannung von ± 36 V liefern können,

zum Einsatz. Der Widerstand der Spule wird durch die folgende Formel berechnet:

$$R_{Spule} = n \cdot l_m \cdot R_{Draht} \quad (25)$$

Wobei n die Windungszahl, l_m die mittlere Länge und R_{Draht} der Drahtwiderstand ist. Der Drahtwiderstand R_{Draht} berechnet sich aus:

$$R_{Draht} = \rho \cdot \frac{l}{A_{Kupferdraht}} \quad (26)$$

Dabei ist ρ der spezifische Widerstand von Kupfer, l die Länge des Drahtes und $A_{Kupferdraht}$ ist der Querschnitt des Kupferdrahts

Ein größerer Drahtdurchmesser hat einen kleineren Widerstand. Dadurch verringert sich die Anzahl der Windungen auf dem Wickelkörper. Für die vereinfachte Berechnung der maximalen Anzahl der Windungen wird nur die Spule betrachtet, für die Berechnung gilt:

$$N_{max} = \frac{A_{Wickelraum}}{A_{Draht+Isolation}} \quad (27)$$

Wobei $A_{Wickelraum} = a \cdot b$, dabei ist a die Länge des Spulenkörpers und b die Höhe des Randes

$$A_{Draht+Isolation} = \pi \cdot r_{Kupferdraht+Isolation}^2 \quad (28)$$

der Spule (Abbildung 16). Für A_{Draht} gilt:

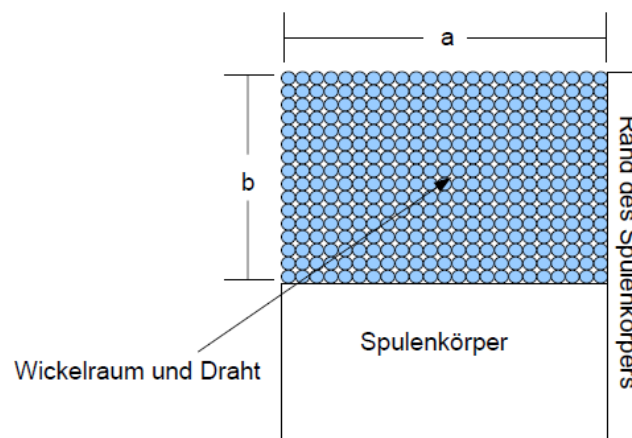


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Wickelraums bei einer zylindrischen Spule mit Angaben der benötigten Parameter für die Berechnung der Wicklungszahl.

Zur Erfüllung der Anforderung von einer magnetischen Feldstärke bis ± 20 kA/m ergeben sich somit verschiedene infrage kommende Drahtdurchmesser. Besser wäre ein größerer Durchmesser mit einem kleineren Widerstand zu verwenden. Es entwickelt sich eine geringere Wärme, die durch den Stromfluss entsteht.

Für die Berechnung soll nach den genannten Anforderungen der Luftkreuzspulen der Spulenwickelkörper möglichst klein sein und eine große Windungszahl besitzen. Die Daten des Luft-Messplatz, wie Geometrie, Windungszahl, Feldstärke und Leistung etc. werden auch berechnet. Vor der Konstruktion wird auch die Spulenbauform in FEMM erstellt und simuliert. Anschließend werden die simulierten mit den errechneten Ergebnissen der Feldstärke verglichen. Nach dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen kann das Modell in FreeCAD konstruiert und später im 3D-Drucker gefertigt werden.

Die Spulen wurden mit 1600 Windungen eines 0,9 mm Kupferdrahts (400 je Spule) bewickelt. Nach der Bewicklung der Spulen werden die Ein- und Ausgangsanschlüsse an die Spulen gelötet, damit sie später im Labor getestet werden können. Die Spulen haben eine zylindrische Form. Das 3D-Modell ist in Abbildung 17 zu sehen. Dabei ist bereits die Anordnung in Kreuzform gezeigt.

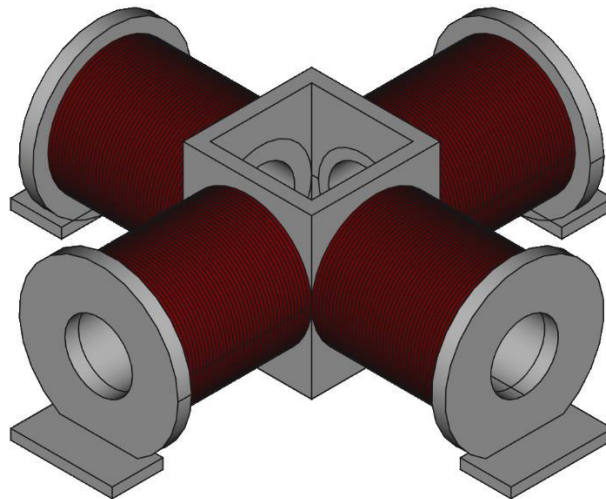


Abbildung 17: 3D-Modell der zylindrischen Kreuzluftspule

Das Ergebnis des Spulenfaktors war fast identisch mit dem Klein-Feld-Kasten von Siebenmorgen [1]. Nach diesem Versuch kommt die Idee von Prof. Riemschneider, eine Kegelbauform zu entwerfen. Diese Bauform der Spule ermöglicht, eine größere Windungszahl als mit der Zylinderbauform zu erreichen und den Platz am Rand der Spulen möglichst gut auszunutzen damit die gewünschte magnetische Feldstärke zu erzeugen.

Für die Berechnungen der magnetischen Feldstärke bei einem Innenabstand von 32 mm werden zwei Werte betrachtet. Zum einen ist der theoretische Wert, der aus der Formel (9) der magnetischen Feldstärke berechnet wird, und zum anderen ist derselbe errechnete Wert mit einer Abweichung von 10 % betrachtet. In der Praxis treten Fehler bei der Bewicklung auf und die Widerstände können größer sein. Für die maximale magnetische Feldstärke werden

verschiedene Drahtdurchmesser berechnet. Die Berechnung basiert auf einer Kegelspule, die aus drei Teilen besteht (Abbildung 18).

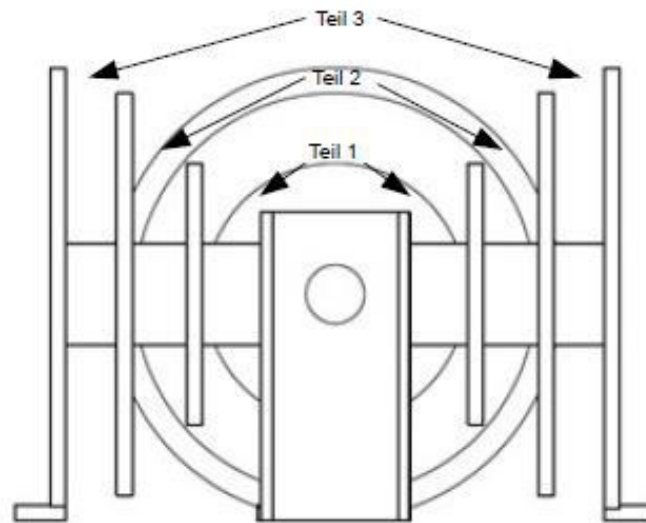


Abbildung 18: Der neue Entwurf der kreuzförmigen Kegelluftspulen

Die drei Teile der Kegelluftspule erhalten verschiedene Windungszahlen, wobei der erste Teil die geringste und der letzte Teil die größte Windungszahl besitzt. Mit dieser Bauform kann die Windungszahl fast dreimal größer sein als bei einer Zylinderspule mit der gleichen Länge. Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Theoretische Berechnungen und Ergebnisse anhand der Kegelspule bei einem Innenabstand von 32 mm für einen Strom von 3,5 A zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Theoretischer Vergleich der Kupferdrahtdurchmesser (ohne Isolation) in der Kegelluftspule

Kupferdrahtdurchmesser [mm]	1	0,9	0,8	0,6
Max Windungszahl Fläche 1	107	132	167	297
Max Windungszahl Fläche 2	365	451	571	1015
Max Windungszahl Fläche 3	637	787	996	1770
Gesamtwindungen	1110	1370	1734	3082
Strom [A]	3,5	3,5	3,5	3,5
Theoretische Feldstärke [A/m]	77673,98	95893,80	121365,59	215761,05
Praktische Feldstärke [A/m]	66022,88	81509,73	103160,75	183396,89
H Mitte des Messraums [A/m]	16505,72	20377,43	25790,19	45849,22
R im Teil 1 [Ohm]	0,94	1,16	1,46	2,60
R im Teil 2 [Ohm]	2,81	3,47	4,39	7,81
R im Teil 3 [Ohm]	4,06	5,01	6,35	11,28
R Gesamt [Ohm]	7,81	9,64	12,20	21,70
Leistung [W] in Teil 1	11,482	14,175	17,941	31,894
Leistung [W] in Teil 2	34,446	42,526	53,822	95,683
Leistung [W] in Teil 3	49,755	61,426	77,742	138,209
Gesamte Leistung [W]	95,683	118,127	149,504	265,786
Induktivität [H]	0,0270	0,0411	0,0658	0,2081

Die errechneten theoretischen Werte der magnetischen Feldstärke in der Tabelle 3 beziehen sich auf die Mitte der Luftspule. Wird die magnetische Feldstärke in der Mitte des Messraums betrachtet, dann sinkt der Wert um 75 % des Maximums. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass sich hier 3 mögliche Zusammenstellungen ergeben, die die genannten Anforderungen von mindestens ± 20 kA/m magnetischer Feldstärke erfüllen. In dieser Auswahl ist es wichtig, dass die Verlustleistung, die als Wärmestrom freigegeben wird, möglichst gering ist, da der Körper der Kreuzluftspule aus Polylactide-Material gebaut ist und eine Schmelztemperatur von 190 °C hat. Wenn nur die gewünschte magnetische Feldstärke erreicht werden soll, wäre hier die Auswahl eines Drahtdurchmessers von 0,9 mm die beste. Da in der HAW kein 0,9 mm Kupferdraht vorhanden ist, wird die Auswahl 0,80 mm Kupferdraht sein. Dabei sollte ein Sicherheitsabstand von 10 % eingehalten werden. Dies ist die Abweichung, die sich bei dem Vergleich zwischen Theorie und Praxis ergab. Diese Forderung ist mit 0,80 mm Drahtdurchmesser erfüllt. Allerdings wird eine Verlustleistung von circa 150 W abgegeben, was zu einer starken Erwärmung führt. Um dies zu umgehen, besteht die Möglichkeit, einen Ventilator an dem Messplatz anzubauen, um die Wärme möglichst gut abzuführen. Ein Problem bleibt noch, dass die Laborleistungsverstärker nicht 7 A an den zwei parallelgeschalteten Spulen liefern können, da nur ein maximaler linearer Strom von 5 A zur Verfügung steht. Um dieses Problem zu beheben, müsste jede Spule bis zu 3000 Windungen besitzen. Man kann stattdessen einen stärkeren Leistungsverstärker verwenden, der einen Strom von 7 A erzeugt.

Die Spulen werden mithilfe einer Drahtwickelmaschine (vgl. Abbildung 19) per Hand gewickelt, da die Bestellung einer bewickelten Kegelspule mit 0,80 mm Kupferdraht viel Geld kosten könnte.

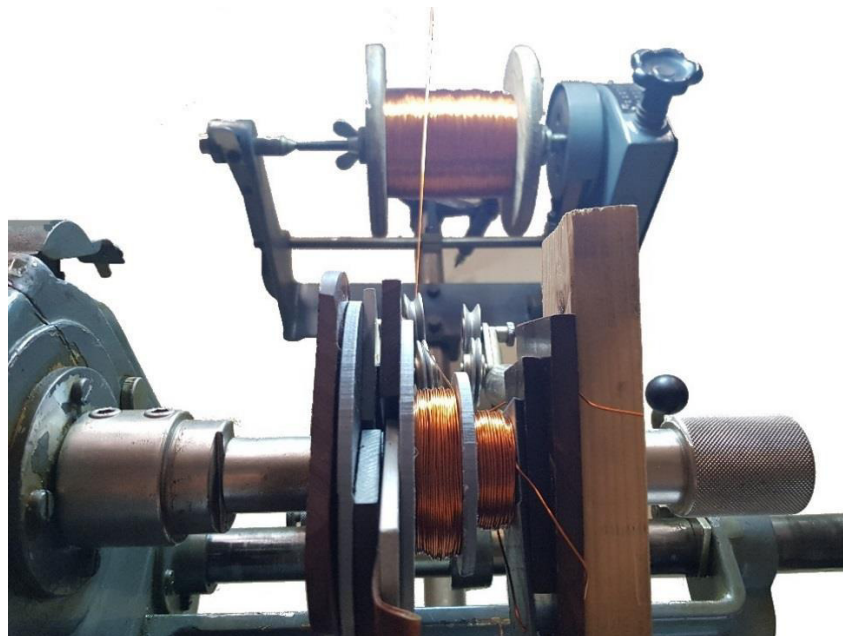


Abbildung 19: Bewicklung einer Spule per Hand

Die Luftkreuzspule wird mit einem 3D-Drucker gefertigt, um wenig ferromagnetisches Material in die Nähe des Messraums zu bringen. Zur Temperaturüberwachung kann ein Temperatursensor an den Spulen platziert werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Konstruktion einer geeigneten Luftkreuzspule ist die Homogenität des Magnetfeldes innerhalb des Messraums. Deshalb wird im Folgenden die Feldverteilung innerhalb der Kegelluftkreuzspule näher betrachtet werden. Abbildung 20 zeigt die simulierte magnetische Feldverteilung.

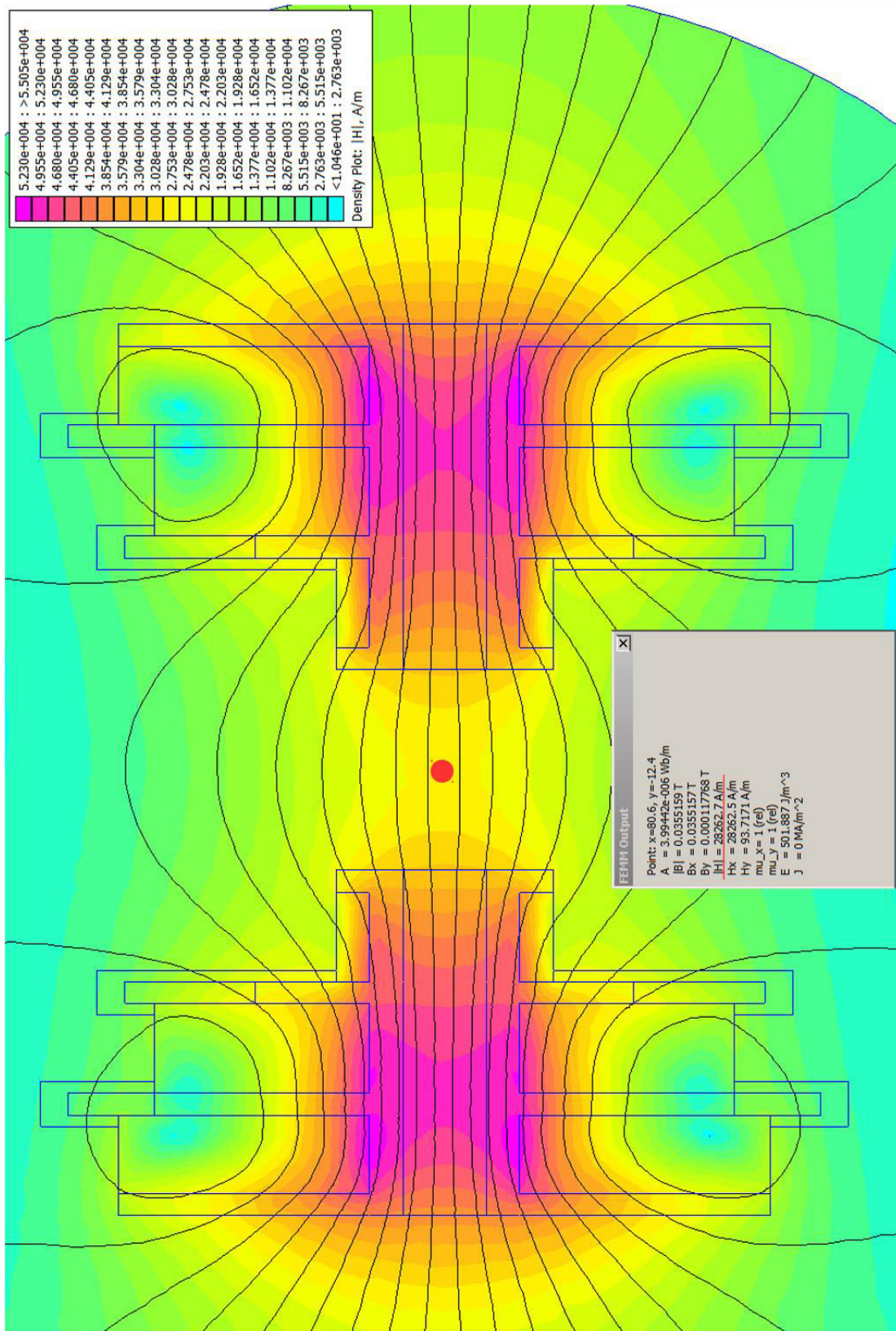


Abbildung 20: Feldstärkesimulation; der rote Punkt stellt den Sensorplatz dar.

In der Simulation wird der Winkelsensor im Mittelpunkt des Luftkreuzspulenpaars platziert (mit rot kenngzeichnet). Die Simulation wird durch die Software FEMM Version 4.2 erstellt. Sie stellt die magnetische Flussdichte zwischen zwei aktiven Spulen dar. Die starke Intensität ist in violetter Farbe dargestellt, die gelbe Farbe gibt die Intensität von mittel bis schwach wieder. Die Simulation ergab eine magnetische Feldstärke von 28,2 kA/m in der Mitte des Spulenpaars mit einem Strom von 3,5 A. Die 3 Teile der Spule sind miteinander in Reihe geschaltet. Die maximal erzeugte Feldstärke beträgt ± 50 kA/m und befindet sich in dem dritten Teil der Spule, wie in folgender Abbildung 21 dargestellt. Wichtig ist, dass der gleiche Strom durch das Spulenpaar fließt, um die gleiche magnetische Feldstärke zu erzeugen.

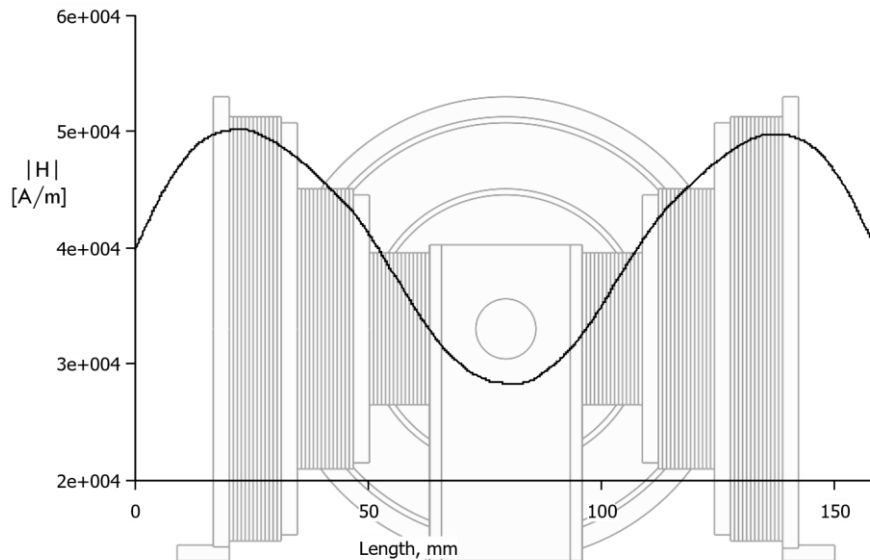


Abbildung 21: Feldstärke im Spulenmessplatz mit den eingezeichneten Bereichen des Messraums und der Spulen

Nach dem Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den berechneten Ergebnissen ergibt sich eine größere Abweichung zwischen den Werten, allerdings waren die Werte größer als der geförderte Wert von 20 kA/m. Der Grund dafür kann an einem Fehler bei der Simulation liegen. Auch die Berechnung der magnetischen Feldstärke kann Fehler aufweisen da die ideale Kegelspule bei der Berechnung aus drei real miteinander verbundenen Zylinderspulen betrachtet wird.

Die Simulationsergebnisse und die berechneten Ergebnisse stimmen miteinander nicht überein, sind aber größer als die gewünschte Feldstärke von 20 kA/m. Bei einem Strom von 3,5 A ergab sich in der Simulation eine Feldstärke von 28 kA/m und aus der Berechnung 21 kA/m. Also ist ein Entwurf der neuen Kreuzkegelspule nun möglich.

Bei der Konstruktion der Kegelspule sollen drei verschiedene Spulengrößen miteinander gekoppelt werden, indem sie mit maximaler Windungsanzahl dicht aneinanderlegen. Die Konstruktionszeichnungen dazu befinden sich im Anhang technische Zeichnungen in Seit 62.

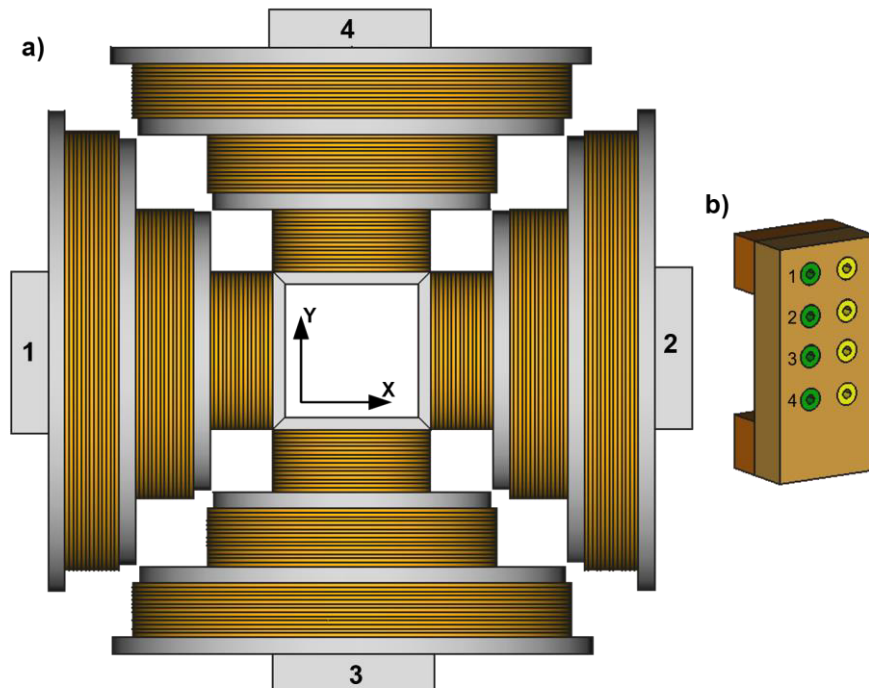


Abbildung 22: a) Das Modell der Kegelluftkreuzspule; Jede Spule ist in 3 Teile geteilt
b) Die Anschlussbox der Spulen

Abbildung 23 zeigt die vier Spulen bewickelt und in einer Holzbox passend verbaut. Die drei Teile der Kegelspule sind mit einer Lötösenleiste verbunden und in Reihe geschaltet. Die Eingänge und Ausgänge der Kegelspule sind mit einer Anschlussbox verbunden. Farblich gekennzeichnete Buchsen ermöglichen eine einfache Wahl der Stromflussrichtung jeder einzelnen Kegelspule. Auf dem Boden der Box sind vier Lüfter mit der Kantenlänge von 50 mm, die sich zwischen den Spulen befinden, angebaut. Die Position der Lüfter sorgt für eine schnelle Abfuhr der Wärme. Die Lüfter sind mit Kunststoffschrauben befestigt, um möglichst ferromagnetische Werkstoffe in der Nähe des Messraums zu vermeiden. Die Lüfter sind parallelgeschaltet und deren Anschlüsse mit zwei 4 mm Buchsen verlötet. Genau in der Mitte der Wände der Holzbox befinden sich vier Löcher. Diese Löcher dienen für die Kontrolle der Sensorplatzierung, Temperaturmessung und für eine zusätzliche Belüftung der Box.

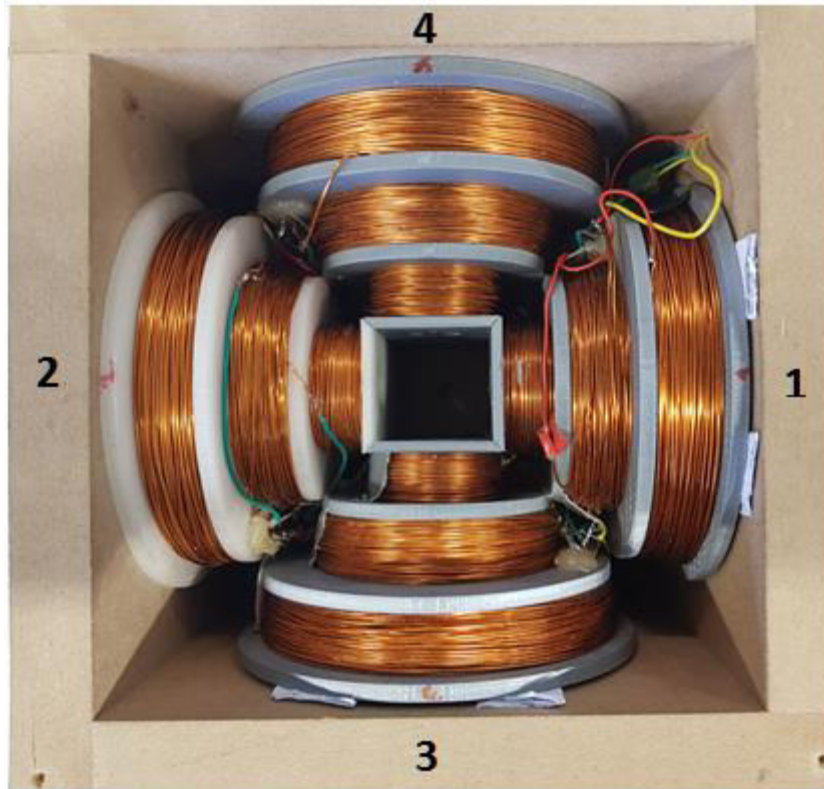


Abbildung 23: Bewickelte Kreuzluftspulen zur Stabilisierung angeordnet in einem Holzbox

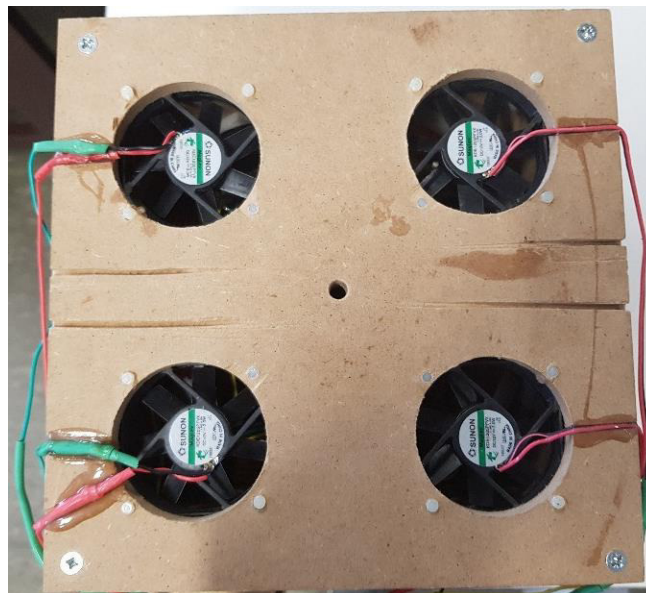


Abbildung 24: Lüftung im Boden des Kreuzspulenkastens

Nach der erfolgten Montage der Kreuzkegelluftspule haben sich die Eigenschaften der Kegelspule, wie die Windungszahl, der Widerstand und die Leistung geändert. Die neuen Werte und deren Abweichungen sind in den folgenden Tabellen 5 und 6 zusammengefasst.

Tabelle 5: Vergleich der theoretischen Werten mit den realen Werten

Kupferdrahtdurchmesser [mm]	0,8 (0,9 mit Isolierung)		
	Theorie	Praktisch	Abweichung
Max Windungszahl Fläche 1	141	140	1,04%
Max Windungszahl Fläche 2	451	500	10,83%
Max Windungszahl Fläche 3	787	700	11,02%
Gesamtwindungen	1379	1340	2,85%
R im Kegelspule 1 [Ohm]	10,42	8,935	14,21%
R im Kegelspule 2 [Ohm]	10,42	8,9	14,55%
R im Kegelspule 3 [Ohm]	10,42	8,783	15,67%
R im Kegelspule 4 [Ohm]	10,42	8,714	16,33%

Tabelle 6: Vergleich der erzeugten Feldstärke bei verschiedenen Stromwerten

Strom [A]	1,5	2,5	3,5
Theoretische Feldstärke [A/m]	35263,16	58771,93	82280,7
Praktische Feldstärke [A/m]	31736,84	52894,74	74052,63
H Mitte des Messraums [A/m]	7934,21	13223,68	18513,16
Leistung in Kegelspule 1 [W]	20,1	55,84	109,45
Leistung in Kegelspule 2 [W]	20,03	55,63	109,03
Leistung in Kegelspule 3 [W]	19,76	54,89	107,59
Leistung in Kegelspule 4 [W]	19,61	54,46	106,75

Aus der Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass sich die Gesamtwindungszahl um 2,85 % verringert hat. Der Grund dafür ist die Verformung der Kegelspule bei der Bewicklung, da der Kegelspulkörper weich und elastisch ist. Wäre der Kegelspulkörper aus härterem Material gebaut, dann würde sich die Verformbarkeit verringern. In Tabelle 6 wurde die magnetische Feldstärke mit verschiedenen Stromwerte berechnet, welche mit der Theorie fast identisch ist. Der maximal erreichte Wert der magnetischen Feldstärke liegt bei ca. ± 14 kA/m bei einem Strom von 5 bis 6 A (nichtlinearer Strom). Das Ziel der gewünschten Feldstärke kann praktisch nicht erreicht werden, ist aber möglich, wenn ein Leistungsverstärker mit einem Strom von $\geq 7,6$ A verwendet wird. Dieser Wert wird zwischen den beiden Spulen gleichmäßig verteilt (3,8 A, pro Spule). Die realen Kegelspulenwiderstände sind um 14,5 % geringer als die theoretischen Werte, wodurch eine geringere Verlustleistung erreicht wird.

3.5 Spulenfaktor und Kennfeldvermessung

Zunächst wird der Spulenfaktor in der Praxis ermittelt und dazu der Mittelpunkt des Messraums bestimmt. Dafür wird die magnetische Feldstärke mithilfe des Gaußmeters für jeden Punkt im Messraum gemessen und ermittelt. Der erste Messvorschlag ist, die Feldstärke im gesamten Messraum aufzunehmen und einzutragen. In der letzten Abschlussarbeit [2] wurde die Feldstärke in dem Messraum automatisiert gemessen. Die X- und Y-Achsen wurden mithilfe von zwei Schrittmotoren gesteuert und die Feldstärke wurde durch die Mess-Sonde des Gaußmeters aufgenommen. Danach wurde der Messraum um 90° gedreht und die Messung nochmals aufgenommen. Schließlich wurden die Messwerte übereinandergelegt und das gesamte Kennfeld dargestellt. Diese Methode ist praktischer und ergibt einen präzisen Wert für den Mittelpunkt der Spulen.

Die Messraumfläche ist $32 \times 32 \text{ mm}^2$, das heißt, es sind 1024 Messpunkt aufzunehmen, was viel Zeitaufwand bedeutet. Nach Überlegungen wurde der betrachtete Messraum verkleinert, sodass nur gegenüber den Spulen gemessen wird, siehe Abbildung 25. Damit reduziert sich die Größe der betrachteten Fläche auf $15 \times 15 \text{ mm}^2$. Es wird ein konstanter Gleichstrom von 1 A an die Spulen angelegt. Um den Mittelpunkt zu finden, muss der Strom durch das Spulenpaar entgegengesetzt fließen. Nun kann mit langsamer Drehung der Nullpunkt der X- bzw. Y-Achse ermittelt werden.

Nach der Ermittlung des Mittelpunkts kann der Spulenfaktor gemessen werden. Die Spulen werden parallelgeschaltet und die Mess-Sonde wird im Mittelpunkt der X- bzw. Y-Achse platziert. 10 Messungen je Achse werden aufgenommen und nach jeder Messung wird die Spannungsamplitude um 1 Vpp erhöht. Eine Zusammenfassung der Messungen ist in Tabelle 7 zu finden. Vor der Spulenfactormessaufnahme werden einige Einstellungen vorgenommen. Zuerst müssen die Spannungen der Leistungsverstärker genau abgeglichen werden und möglichst wenig Abweichung zeigen, d. h. die Subtraktion der beiden Signale auf dem Oszilloskop muss einen möglichst kleinen Wert ergeben. Ein stufenförmiges Dreiecksignal, wie in Abbildung 26, wird in den Funktionsgenerator geladen, Mit dieser Signalform folgt der Vermessung der Spulen. Die Datenerfassung erfolgt über ein MATLAB-Skript, das von Schüthe [21] geschrieben wurde. Für die Messung wird eine Signalfrequenz von 10 m Hz

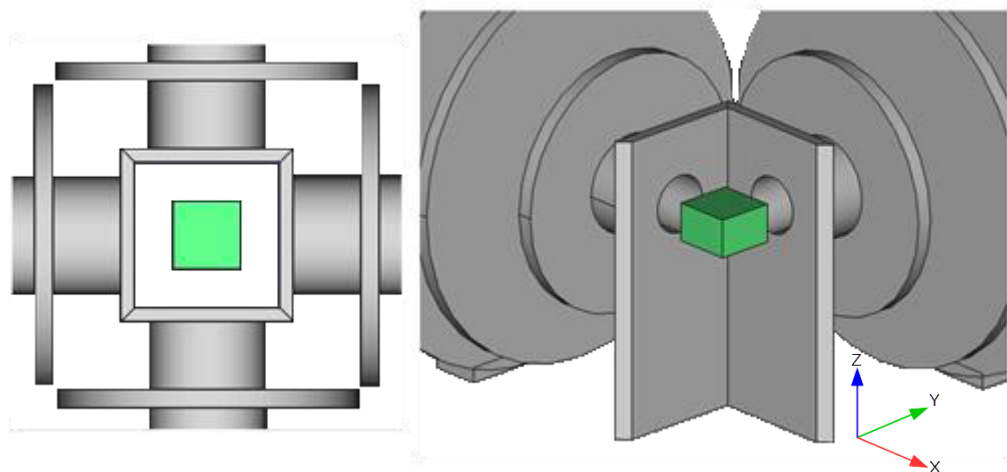


Abbildung 25: Untersuchungsfeld für den Mittelpunkt der Kegelkreuzluftspule

eingestellt. Für eine genauere Messung wurde ein Halter für das Gaußmeter entworfen, siehe Abbildung 27.

Wenn die Messaufnahme in der X-Achse erledigt ist, wird die Anordnung um 90° gedreht und die Messung für die Y-Achse aufgenommen.

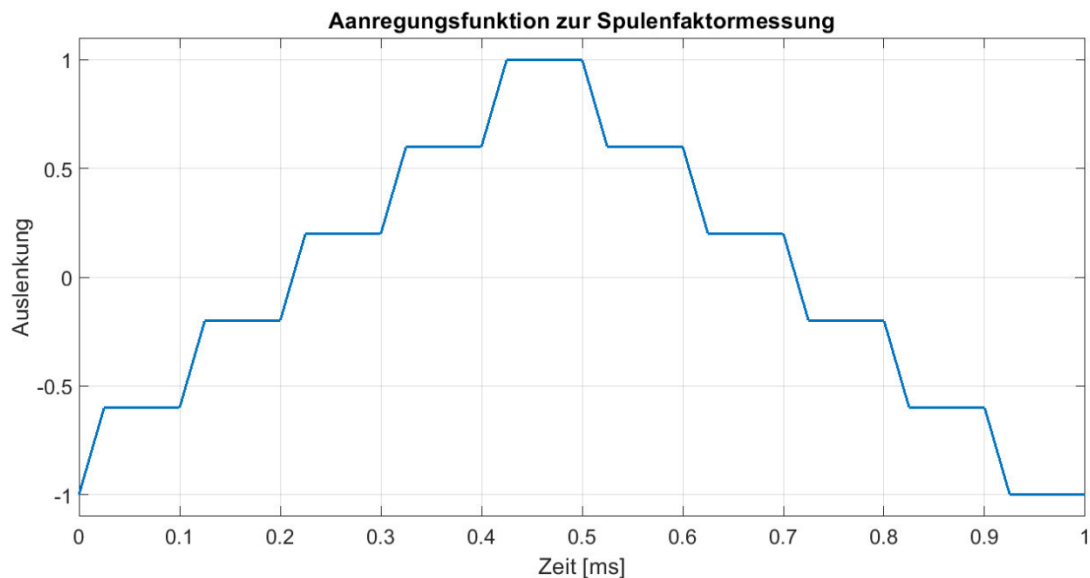


Abbildung 26: Verlauf der stufenförmigen Anregungsfunktion

Tabelle 7: Spulenfactormessung der X-Achse

X-Achse (Zwischen den Spulen 1 & 2)							
U in [V]	I an 0.25 Ohm [A]		H [A/m]		Spulenfaktor		Mittelwert
	min	max	min	max	1	2	
1,00	-0,433	0,441	-1040	1070	2401,85	2426,30	2414,08
2,00	-0,849	0,899	-2090	2120	2461,72	2358,18	2409,95
3,00	-1,27	1,33	-3130	3170	2464,57	2383,46	2424,01
4,00	-1,70	1,76	-4170	4210	2452,94	2392,05	2422,49
5,00	-2,13	2,18	-5210	5250	2446,01	2408,26	2427,13
6,00	-2,54	2,62	-6240	6270	2456,69	2393,13	2424,91
7,00	-2,95	3,04	-7230	7290	2450,85	2398,03	2424,44
8,00	-3,37	3,45	-8240	8270	2445,10	2397,10	2421,10
9,00	-3,79	3,87	-9200	9270	2427,44	2395,35	2411,39
10,00	-4,12	4,2	-10170	10180	2468,45	2423,81	2446,13
Mittelwert [1/m]					2447,56	2397,57	2422,56

Tabelle 8: Spulenfaktormessung der Y-Achse

Y-Achse (Zwischen den Spulen 1 & 2)							
U in [V]	I an 0.25 Ohm [A]		H [A/m]		Spulenfaktor		Mittelwert
	min	max	min	max	1	2	
1,00	-0,433	0,441	-1120	1150	2586,61	2607,71	2597,16
2,00	-0,857	0,89	-2240	2270	2613,77	2550,56	2582,17
3,00	-1,16	1,25	-3200	3220	2758,62	2576,00	2667,31
4,00	-1,71	1,76	-4480	4500	2619,88	2556,82	2588,35
5,00	-2,12	2,20	-5590	5590	2636,79	2540,91	2588,85
6,00	-2,54	2,62	-6660	6670	2622,05	2545,80	2583,92
7,00	-2,91	3,00	-7690	7710	2642,61	2570,00	2606,31
8,00	-3,33	3,41	-8740	8730	2624,62	2560,12	2592,37
9,00	-3,74	3,83	-9740	9730	2604,28	2540,47	2572,37
10,00	-4,12	4,20	-10680	10660	2592,23	2538,10	2565,16
Mittelwert [1/m]					2630,15	2558,65	2594,40

Wie aus den Tabellen 7 und 8 zu erkennen ist, besitzt der Spulenfaktor einen Mittelwert von $2422,56 \text{ m}^{-1}$ für die X-Komponente und einen Mittelwert von $2594,40 \text{ m}^{-1}$ für die Y-Komponente. Die Abweichung des Spulenfaktors zwischen X- und Y-Komponente beträgt $171,83 \text{ m}^{-1}$ ca. 6% ist. Die maximale erzeugte magnetische Feldstärke in den neuen Kegelluftspulenmessplatz beträgt $\pm 14 \text{ A/m}$. Nun ist der Luftkreuzspulenmessplatz zum Einsatz bereit und der Winkelsensor kann in der Mitte des Messraums platziert werden.

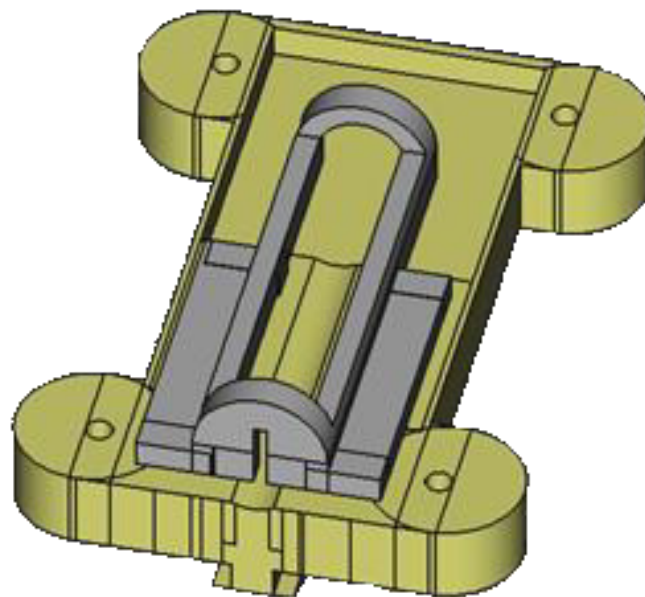


Abbildung 27: 3D-CAD Modell der Halterung für die Mess-Sonde des Gauß-Meter

3.6 Probleme mit dem Shuntwiderstand

Der Shuntwiderstand ist ein sehr wichtiges Bauteil unserer Schaltung. Er wird zwischen den Leistungsverstärken und dem Kreuzspulenmessplatz angeschlossen. Diese niederohmigen Widerstände dienen zur Messung der Ströme der Leistungsoperationsverstärker im Oszilloskop. Der Shuntwiderstand im Labor besteht aus vier parallelgeschalteten $1\ \Omega$ Metalloxidschichtwiderständen je Eingang. Diese Widerstände wurden durch viele Kennfeld- und Spulenfactormessungen überlastet und waren defekt. Sie wurden durch Metallschichtwiderstände ersetzt. Bei langen Messzeiten erzeugten sie viel Wärme, welche zur Verfälschung der Messungen führt. Um weiterhin eine exakte Messung zu erlauben, werden Leistungswiderstände eingesetzt (vgl. Abbildung 28).

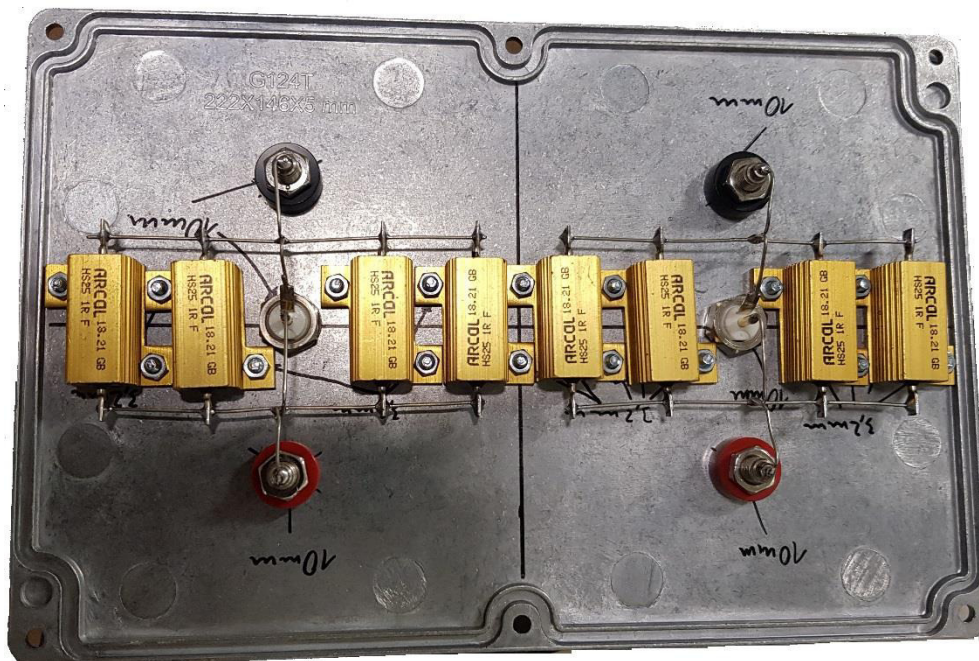


Abbildung 28: Shuntwiderstände zusammengesetzt aus je vier parallelgeschalteten $1\ \Omega$ Leistungswiderständen

4 Messung und Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zuerst das Konzept der Platzierung des Winkelsensors im Mittelpunkt des Messraums erklärt. Es werden die Methoden und Einstellungen beschrieben, mit denen eine bestmögliche Charakterisierung durchgeführt werden kann. Im Weiteren sind die Schritte für die Messung vorgestellt. Am Schluss werden die aufgenommenen Kennfelder, die Kennlinien sowie die Hysterese der Winkelsensoren diskutiert.

4.1 Positionierung des Sensors im Kreuzspulenmessplatz

Vor dem Beginn der Messung wird der Winkelsensor genau in der Mitte des Kreuzspulenmessraums eingebracht, so dass er sich in einem homogenen Magnetfeld befindet.

Um einen Winkelsensor leichter und genau in der Mitte des Kreuzspulenmessplatzes zu platzieren, kann das Kreuzlicht in der Mitte der Eisenmessplatz verwendet, bzw. mithilfe der Abmessungen der X- und Y-Achse der genaue mittlere Platz gefunden werden. Abbildung 29 liegt ein Simulationsmodell des Kegelluftspulenmessplatzes zur Charakterisierung der magnetischen Intensität im Messraum. In Quadrat in der Mitte des Messraums ist das Magnetfeld homogen. Je näher der Sensor an einer Spule ist, desto stärker ist das gemessene Magnetfeld der entsprechenden Spule und umso schwächer der Messwert der anderen Spule. Dies führt zu einer Asymmetrie und damit zur Verfälschung der Messung.

Der Winkelsensor wird an einem Stab befestigt, um ihn in der Mitte des Messplatzes zu positionieren. Der Stab muss aus einem Material bestehen, das nicht durch das Magnetfeld beeinflusst wird, sonst werden die Messungen durch die magnetischen Eigenschaften des Stabs verfälscht. Aus diesem Grund wird ein Holzstab bzw. ein besonderer Sensorhalter, der aus Kunststoff besteht, verwendet. Dieser Sensorhalter wird mittels FreeCAD konstruiert und mit einem 3D Drucker gefertigt. Der Winkelsensor wird genau horizontal zur X- und Y-Achse an dem Stab befestigt. Die Messergebnisse können verfälscht werden, wenn der Winkelsensor zu den Achsen verkippt wäre bzw. die Spulenbox nicht gerade ausgerichtet ist. Um die Winkelsensoren mit Energie zu versorgen, werden Batterien bzw. eine regelbare konstante Spannungsquelle verwendet.

In dieser Arbeit werden zwei Typen der Messplätze eingesetzt. Bei dem Messplatz von Zippel [2] besitzen die Kreuzspulen Elektrolechkerne. Diese Elektrolechkerne verstärken die magnetische Feldstärke, indem die Magnetfeldlinien durch den Blechkern geführt werden (vgl. Kapitel 2). Da die Elektrolechkerne selbst eine Hysterese haben, kann die Winkelsensorhysterese verfälscht werden. Zu diesem Grund werden für die Darstellung der Hysterese der getesteten Winkelsensoren Klein-Feld-Kasten bzw. die neu gebauten Kegelluftkreuzluftspulen verwendet. Mit diesen Messplätzen werden Magnetfelder durch eine modulierte Spannungsamplitude mit kleinen Frequenzen erzeugt, um den Verlauf der Hysterese eines Winkelsensors herauszustellen. In allen Spulenkästen sind Lüfter angebaut, um die entstehende Wärme durch den Stromfluss in den Spulen abzuführen. Zwecks Sicherheit kann die Temperatur der Spulen durch ein Temperaturmessgerät gemessen und kontrolliert werden.

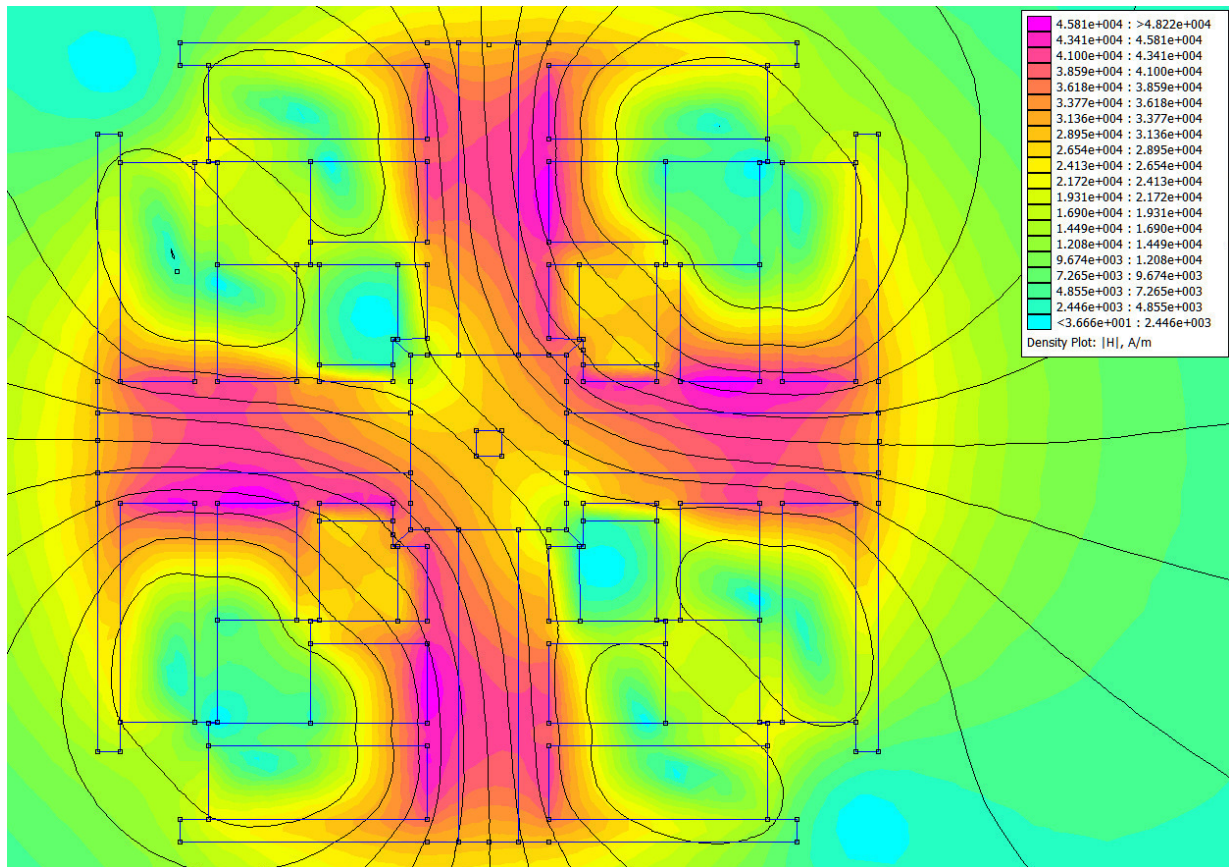


Abbildung 29: Simulation der Magnetfeldintensität des Kegelluftmessplatzes. Der Sensor wird in dem Quadrat in der Mitte des Messraums eingebracht. In der Simulation wird ein 135° gedrehtes Magnetfeld dargestellt

In Abbildung 29 ist zu erkennen, dass sich in der Mitte des Messplatzes ein homogener Bereich ausbildet. Dieser Bereich hat eine Größe von $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Er ist groß genug, um die Sensoren in einem homogenen Feld vermessen zu können

4.2 Messeinstellung

Vor dem Start einer Messung müssen verschiedene Parameter in MATLAB sowie am Oszilloskop eingestellt werden. Die Einstellungen betreffen die Spannungsamplitude, Frequenz, Signallaufzeit sowie die Aufnahmelänge. Es folgt eine Erläuterung dieser Schritte.

4.2.1 Messdurchläufe

Um ein vollständiges geschlossenes Kennfeld zu erhalten, müssen mindestens 10 Messdurchläufe mit einer Dauer von 20 Minuten aufgenommen werden. Ein deutliches sauberes Kennfeld kann je nach Sensor ab zwei Stunden Aufnahmezeit verwirklicht werden.

Die gewünschte aufgenommene Anzahl der Messdurchläufe kann im MATLAB-Skript „ksmp_field_meas_air_coil_angle_sensor“ mit der Variablen „square“ angepasst werden.

Um eine bessere Auflösung in dem dargestellten Kennfeld zu erreichen, wurde ein MATLAB-Skript geschrieben, um mehrere Messdateien zu verknüpfen, d.h. die Messdateien, die in verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden, können auch mit anderen Messdateien zusammengefügt werden. Danach können die Messdateien mit dem MATLAB-Skript „field_diagram_statistical_method_analyse“ bearbeitet und das Kennfeld sowie die Auswertungen dargestellt werden.

Eine Kennfeld-Dateigröße kann von 100 MByte bis zu 4,8 GByte groß sein. Beim Prozess einer Messdatei mit mehr als 5,5 GByte gibt MATLAB eine Fehlermeldung (vgl. Abbildung 30). Diese Datei benötigt zu viel Arbeitsspeicher, wenn die Evaluation stattfindet. Würde ein PC mit 32 GByte RAM verwendet werden, könnte eine Datei mit dieser Größe problemfrei verarbeitet werden.

```

=====
|           Speicherung fertig           |
=====

>> field_diagram_statistical_method_analyse
selected file: 2018_06_08_ksmp_angle_all.mat
hy_hx_avg quality: 3.438
Out of memory. Type HELP MEMORY for your options.
Error in gradient (line 67)
    g(2:n-1,:) = (f(3:n,:)-f(1:n-2,:)) ./ (h(3:n) -
        h(1:n-2));
Error in field_diagram_statistical_method_ksmp2
(line 248)
    hx_grad = sign(gradient( hx_filt ));
Error in field_diagram_statistical_method_analyse
(line 39)
    a3,a4] =
        field_diagram_statistical_method_ksmp2(FileNameComp
ft >>

```

Abbildung 30: Fehlermeldung bei der Kennfelddarstellung einer Messdatei größer als 5 GB

4.2.2 Spannungsamplitude und die Frequenz

Eine der wichtigsten Einstellungen ist die Spannung, mit der die Spulen angeregt werden. Die Spannungen sollen ein dreieckförmiges Signal haben, um Verzerrung zu vermeiden. Die Dreieckssignale sollen innerhalb der Aufnahmedauer jeden Punkt des Kennfeldes treffen und häufig abdecken. Daraus entsteht ein Gitter, das über die XY-Anzeige auf dem Oszilloskop angezeigt werden kann. Ein dichtes Gitter entspricht einer hohen Kennfeldauflösung. Die Frequenzen der beiden Kanäle sollen nicht die gleiche Frequenz besitzen, sonst wird die Messung verfälscht. Wichtig auch bei den Frequenzen ist auch, dass die beiden Frequenzen sich nach 10 bis 15 Zeiteinheiten wiederholen, siehe Abbildung 31. Die Frequenzen dürfen

nicht geradzahlig sein, um nicht immer wieder dieselben Punkte zu treffen. Diese beschriebene Methode wurde von Zippel und Krey entworfen

Die gegebenen Frequenzen können auch in MATLAB mit dem Skript ‚testFreq.m‘ getestet werden, wie in Abbildung 32 gezeigt. Im Test wird eine niedrigere Frequenz bevorzugt, da eine hohe Frequenz zu einer großen Induktivität führt. Die Induktivität wirkt gegen die anliegende Spannung und verringert den Strom und damit den Widerstand. Eine hohe Frequenz bedeutet eine schnelle Änderung der Spannung bzw. des Stromes und führt zu einer großen Selbstinduktion, welche zur Schädigung der verwendeten Leistungsoperationsverstärker führen können. Wichtig für die Messung ist, dass die Ein- und Ausgangsleitungen des Sensors miteinander verdrillt werden, um möglichst störungslose Ausgangssignale zu gewährleisten.

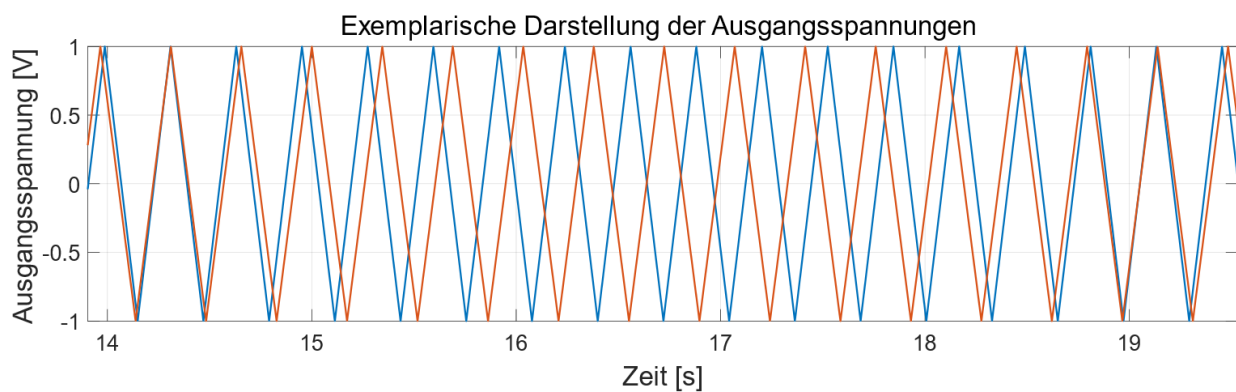


Abbildung 31: Spannungsverlauf von zwei dreieckförmigen Signalen mit unterschiedlichen Frequenzen nach Zippel und Kery

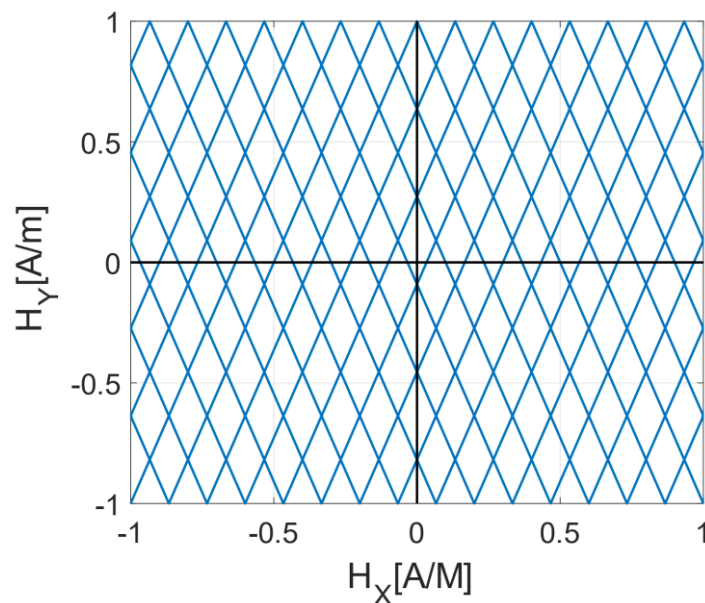
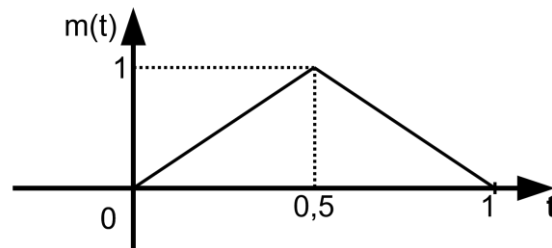


Abbildung 32: Exemplarische Kennfelddarstellung nach Zippel und Kery

4.2.3 Amplitudenmodulation

Für die Kennfeldmessung wird eine Amplitudenmodulation eingesetzt. Das Modulationssignal $m(t)$ ist dreieckförmig, hat bei $t = 0$ s und $t = 1$ s eine minimale Amplitude von 0 V und bei $t = 0,5$ s ein Maximum von 1. Dabei ist eine Modulationsfrequenz von 1 Hz eingestellt.



Mit dem Modulationssignal $m(t)$ werden die beiden Trägersignale $c_1(t)$ und $c_2(t)$ moduliert.

$$c_1(t) = \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$$

$$c_2(t) = \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t)$$

$$\text{mit } f_0 = \frac{f_s}{f_A}$$

Die Signalfrequenz f_s beträgt bei allen Messungen 250 Hz. Die Abtastfrequenz f_A liegt mit 48 kHz deutlich über der Nyquist-Frequenz, sodass die Signale c_1 und c_2 vollständig repräsentiert werden. Die Anregungsfunktionen e_1 und e_2 für den Spulenmessplatz sind gegeben durch die Multiplikation des Modulationssignals mit je einem Trägersignal:

$$e_1(t) = m(t) \cdot c_1(t)$$

$$e_2(t) = m(t) \cdot c_2(t)$$

Die Frequenz der gesamten Signale $e_1(t)$ und $e_2(t)$ kann über den Funktionsgenerator verändert werden.

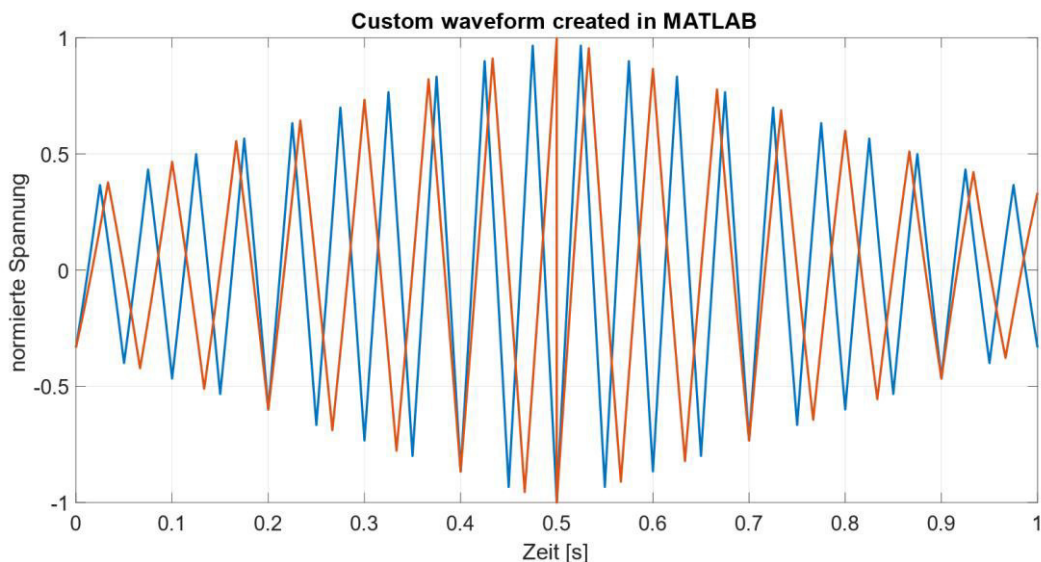


Abbildung 33: Verlauf der Anregungsspannung für den Eisenkreuzspulenmessplatz mit kleinen Frequenzen.

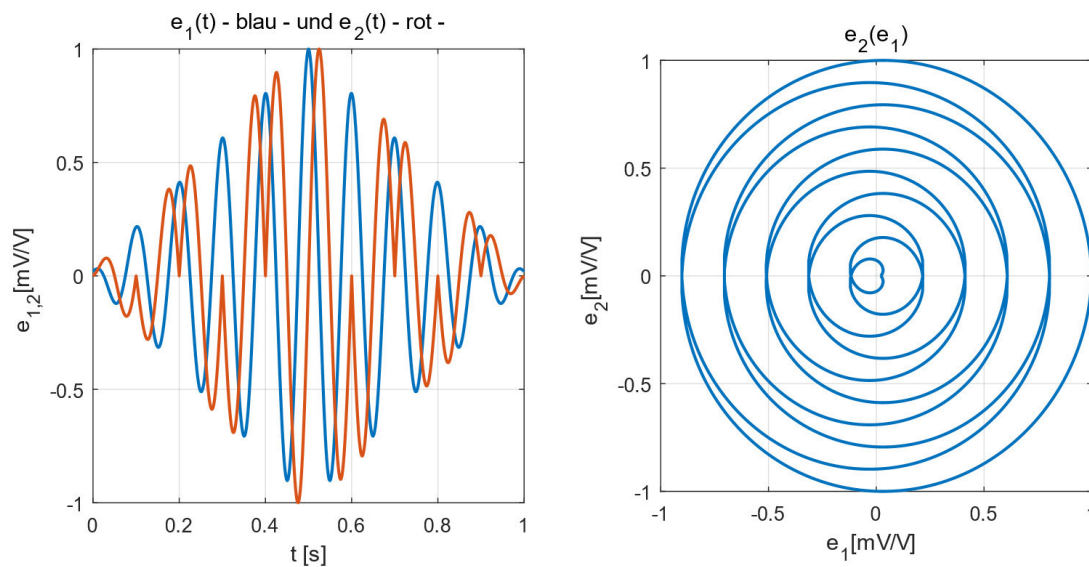


Abbildung 34: Verlauf der Anregungsfunktionen der Drehfelderregungsspannung mit Vor- und Rückwärtsverlauf bei 180°

Der Verlauf der Signale ist in Abbildung 34 gezeigt. Bei jeder Anregung auf der X-Komponente wird die Y-Komponente zweimal hintereinander angeregt. Daneben ist ein exsamlarische spirale Verlauf des Kennfeldgitter.

4.2.4 Signallaufzeit

Die Signallaufzeit beschreibt die komplette Laufzeit einer Wellenform durch ein Quadrat im Oszilloskopbildschirm. Bei einer Laufzeit von 10 Sekunden dauert eine komplette Messaufnahme 100 Sekunden, und dauert über eine Stunde bei einer Laufzeit von 400 Sekunden. Man kann maximal bis 1000 Sekunden für einen einzigen Shot aufnehmen, was einer Laufzeit von 2 Stunden und 46 Minuten entspricht. Dies ist aber nicht praktikabel, da die Spulen überlastet und möglicherweise zerstört werden könnten.

4.2.5 Die Aufnahmelänge und weitere Einstellungen

Diese stellt die Nummer der aufgenommenen Punkte in einer kompletten Wellenform dar. Im Oszilloskop MSO 3034, welches im Labor verwendet, kann eine Aufnahmelänge von 1000 bis maximal 5 Millionen Punkten in einer kompletten Wellenform gespeichert werden.

Im MATLAB-Code ist es auch notwendig, den Spulenfaktor je nach der benutzten Spulenbox anzupassen, da jede Spulenbox anders gebaut ist und andere Eigenschaften besitzt. Der maximale Spulenfaktor ist 20617 m^{-1} bei dem Eisen-Messplatz zu erreichen. Die

Amplitudenskalierung ist so zu wählen, dass die Wellen den Anzeigebereich des Oszilloskops nicht überschreiten, da sonst die Messung verfälscht wird.

Sehr wichtig ist auch, dass die beiden Leistungsoperationsverstärker auf die Nulllinie eingepegelt werden, wenn kein Signal verstärkt wird. Die Versorgungsspannung des Winkelsensors kann sowohl mit Batterien als auch mit einem Labornetzgerät betrieben werden.

Wichtig dabei ist, dass die beiden Spannungseingänge des Winkelsensors identisch sein müssen, um fehlerfreie Ergebnisse zu erhalten.

Für exakte Ergebnisse bei den Messungen sollen die Phasen der Ausgangsspannungen mit den Eingangsspannungen möglichst gleich verlaufen (vgl. Abbildung 35). Der Nulldurchgang der Eingangsspannung der X-Komponente (Ch1: rot) entspricht dem Sinussignal (Ch3: lila) und die Eingangsspannung der Y-Komponente (Ch2: blau) entspricht dem Kosinussignal (Ch4: grün).

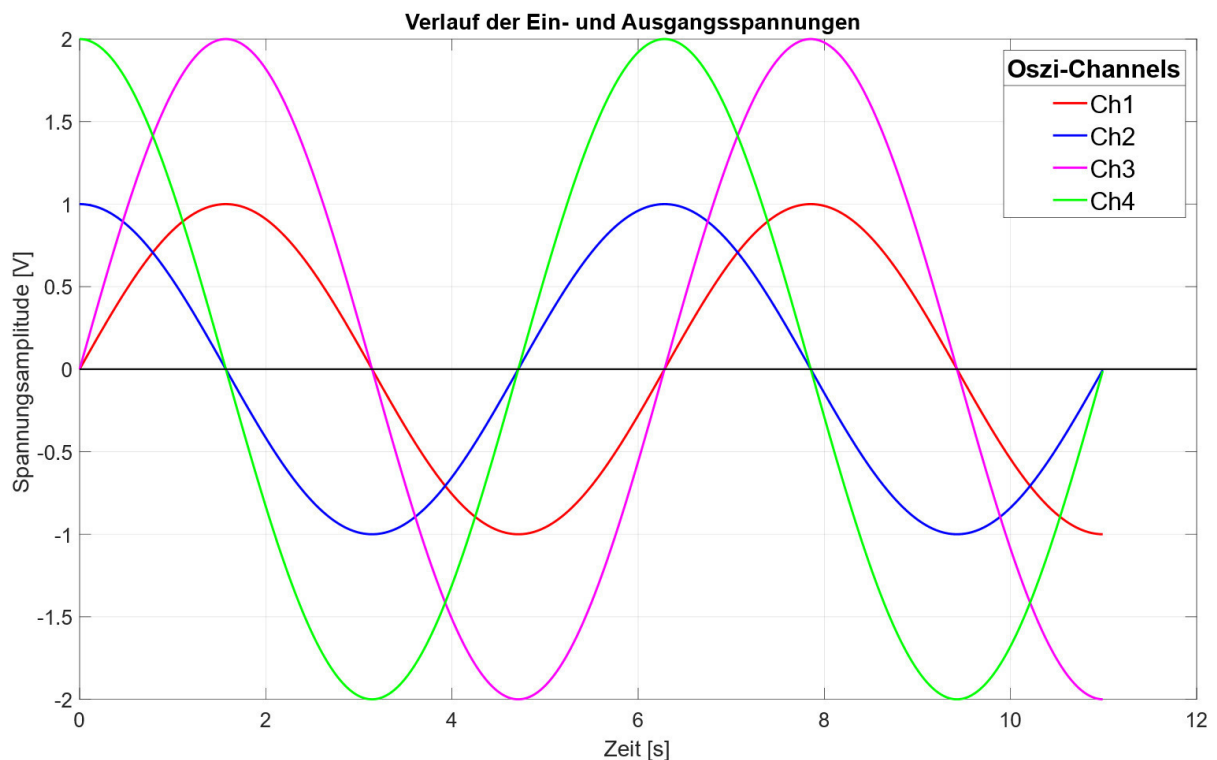


Abbildung 35: Exemplarischer Darstellung des Verlaufes der Ein- und Ausgangsspannungen im Oszilloskop

4.3 Messergebnisse

Die Messergebnisse wurden mit zwei Messplätze aufgenommen. Die Kennfelder sowie die Kennlinie wurden mit dem Eisenmessplatz und die Untersuchung der Hysterese sowie die Sättigungsbereiche der Winkelsensoren wurden mit dem Kegelluftmessplatz durchgeführt.

Die aufgenommenen Messergebnisse werden mit einem MATLAB-Skript bearbeitet. Das Skript „field_diagram_statistical_method_analyse“ wurde von Krey [3] geschrieben und von Schüthe [21] und mir modifiziert.

Bei der Messung werden zuerst die Spulenpaare X und Y angeregt. Das H_x - bzw. H_y -Feld wird mithilfe der Funktion „scope_capture_ksmp_field_angle_sens2“ auf dem Oszilloskop aufgezeichnet. Die Stärke des Magnetfeldes ist von der eingesetzten Spulenbox abhängig, das verwendete Verfahren ist bei jeder Spulenbox gleich. Nach der Aufzeichnung werden die Daten in bestimmte Ordner durch MATLAB gespeichert. Die Dateien werden in dem oben genannten Skript sortiert, verarbeitet und schließlich das Kennfeld erstellt. In Folgenden werden die Messergebnisse vorgestellt und diskutiert.

4.3.1 Messergebnisse der Eisenmessplatz

Mit diesem Messplatz wurden die Kennfelder sowie die Kennlinie aufgenommen. Die dargestellten Kennfelder auf den nächsten Seiten wurden von den Messdateien des AAT001-10E-Winkelsensors von NVE und TAS2141-AAAB von der Firma TDK aufgenommen. Die charakterisierten Kennfelder der Winkelsensor von TDK zeigen klare Ergebnisse bei der Messung. Im Gegensatz zu dem AAT001-10E waren die Kennfelder immer schräg dargestellt.

Die Sensorausgangsspannungen wurden als Farbwerte in den Abbildungen wiedergegeben. Die rote Farbe entspricht einer hohen Ausgangsspannung und die blaue Farbe steht für eine niedrige Ausgangsspannung. Auf dem Balken neben dem Diagramm werden die Spannungswerte in der Einheit [mV/V] angegeben. Auf den Achsen sind die Feldkomponenten H_x und H_y aufgetragen. Auf der X-Achse wird das H_x -Feld und auf der Y-Achse wird das H_y -Feld dargestellt. Die Diagramme sind mit gleichen Messreihen erstellt worden.

In den Abbildungen 36 und 39 werden vier Diagramme dargestellt, jeweils ein Diagramm für das steigende bzw. das fallende H_x -Feld und für das H_y -Feld. Die Diagramme wurden mit einer magnetischen Feldstärke von ± 50 kA/m für den TDK-Winkelsensor und ± 30 kA/m für den NVE-Winkelsensor dargestellt. Der Test wurde unter Zimmertemperatur mit 4,5 V Betriebsspannung durchgeführt.

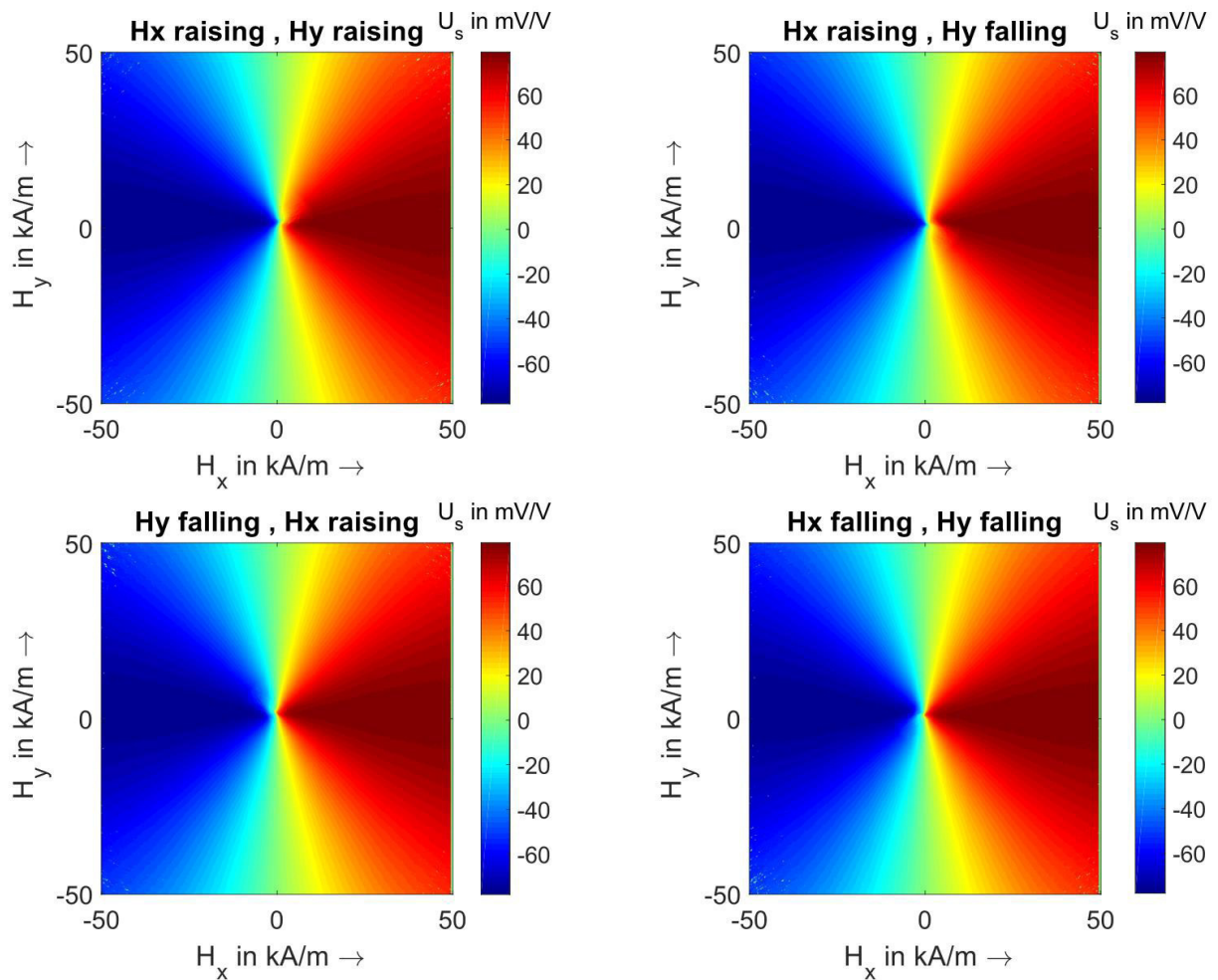


Abbildung 36: Erzeugte steigende und fallende Felder von H_x und H_y stellen Kennfelder für 4 verschiedene Fälle dar (TDK-Sensor)

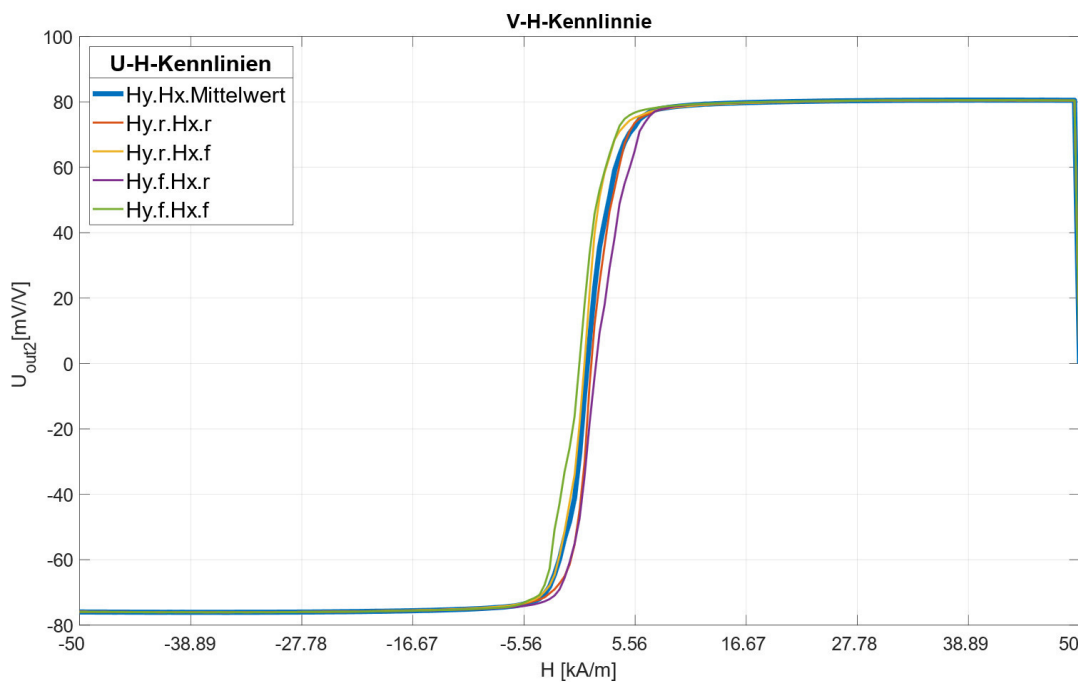


Abbildung 37: Darstellung der V-H-Kennlinie für 4 verschiedene Fälle mit Mittelwert, wobei „r“ für steigend steht und „f“ für fallend (TDK-Sensor)

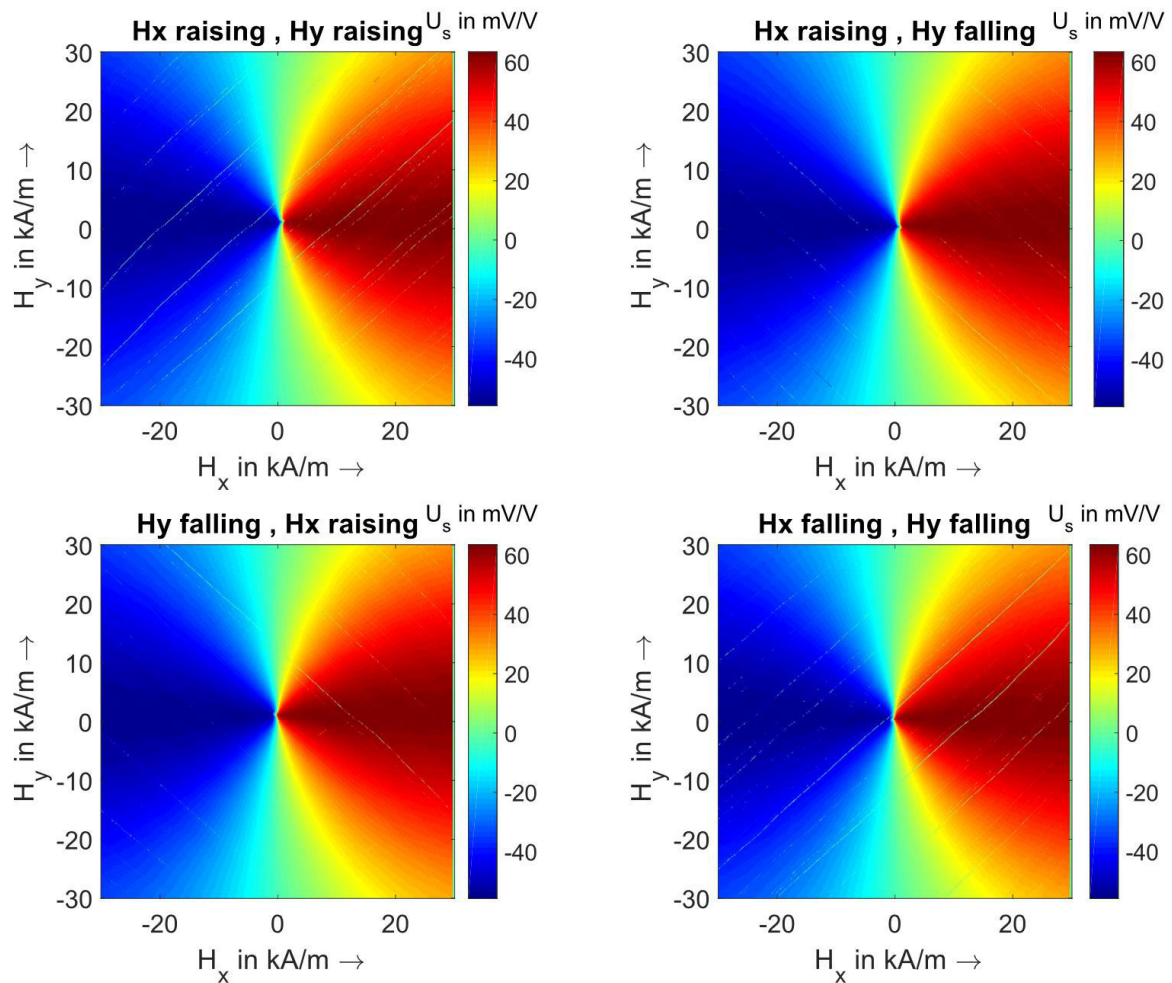


Abbildung 38: Erzeugte steigende und fallende Felder von H_x und H_y stellen Kennfelder für 4 verschiedene Fälle dar (NVE-Sensor). Die Kennfelder verschieben sich um 5 kA/m bei H_x und um 2 kA/m bei H_y

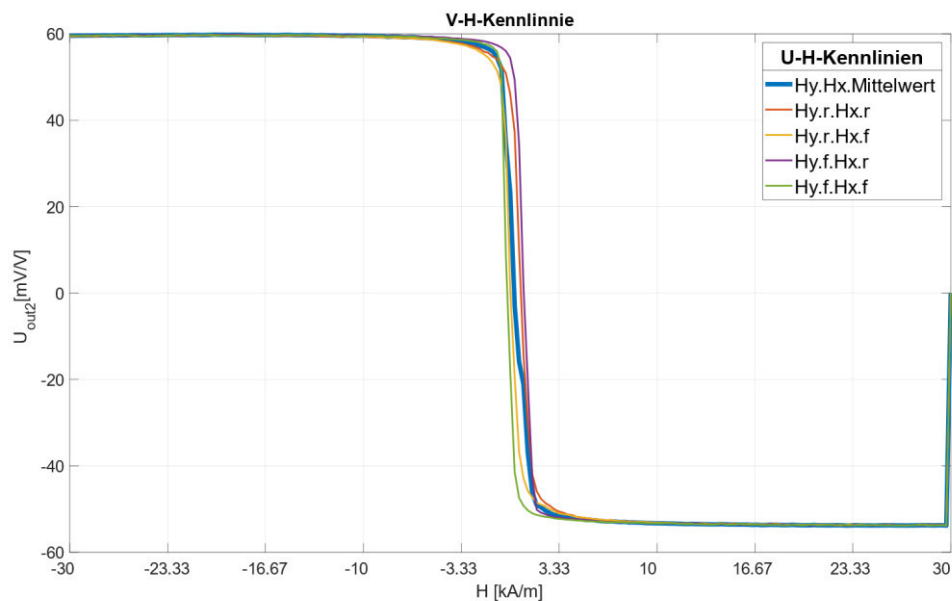


Abbildung 39: Darstellung der V-H-Kennlinie für 4 verschiedene Fälle mit Mittelwert, wobei „r“ für steigend steht und „f“ für fallend (NVE-Sensor)

Wie aus den Diagrammen 38 und 39 zu erkennen, dass schräge Kennfelder von den Messwerten der NVE-Winkelsensor entstanden sind. Eine deutliche Verschiebung zu dem positiven Bereich ist auch festzustellen. Der Messungen wurden mehr Mals mit 5 anderen NVE-Winkelsensoren durchgeführt und die Ergebnisse waren fast identisch. Der Grund ist noch nicht festgestellt. Dieses Problem kann in den weiteren Arbeiten weiter untersucht werden.

4.3.2 Messergebnisse des Kegelluftmessplatzes

Nach erfolgreicher Darstellung der Kennfelder und der Kennlinien soll nun die Hysterese der Winkelsensoren mithilfe des neuen Kreuzluftspulenmessplatzes gemessen und dargestellt werden. Dafür wurde ein spirales Drehfeldmess-MATLAB-Skript sowie eine passende modulierte Anregungsfunktion gefertigt. Die beiden Eingangsspannungen werden mit sehr kleinen Frequenzen betrieben (in mHz) und haben eine 90° Phasenverschiebung. Das aufgenommene Kennfeld soll wie ein Kreis mit verschiedenen Farbwerten erscheinen, siehe Abbildungen 40, 41 und 42. Die weiße Linie in den Kreisdiagrammen werden durch die $U_{\sin}(H_{XY})$ - und $U_{\cos}(H_X)$ -Diagrammen beschrieben. Die folgenden Diagramme zeigen den Hysterese- sowie die Sättigungsbereiche der Winkelsensoren KMZ60, NVE und TDK. Für den NVE-Winkelsensor waren die Aufnahmen immer schräg.

Um die Hystereseeffekte zu beschreiben, wird ein Modell aus der Literatur verwendet:

- Die Anwendung räumlich-integraler Modelle nach Preisach/Mayergoyz [22]. Hier wird der Winkelsensor mit bestimmten Feldstärkenvektoren beaufschlagt und aus den aufgenommenen Ausgangsspannungen ein Modell berechnet. Mittels dieses vektoriellen Hysterese Modells kann aus dem angelegten Feldstärkenvektoren und der Historie der Feldstärkenvektoren die Ausgangsspannung berechnet werden [3].

Weitere Analysen der Hystereseeffekte der Winkelsensoren sind kein Bestandteil dieser Arbeit.

Die Diagramme wurden mit einer magnetischen Feldstärke von ± 12 kA/m. Der Test wurde unter Zimmertemperatur mit 4,5 V Betriebsspannung durchgeführt.

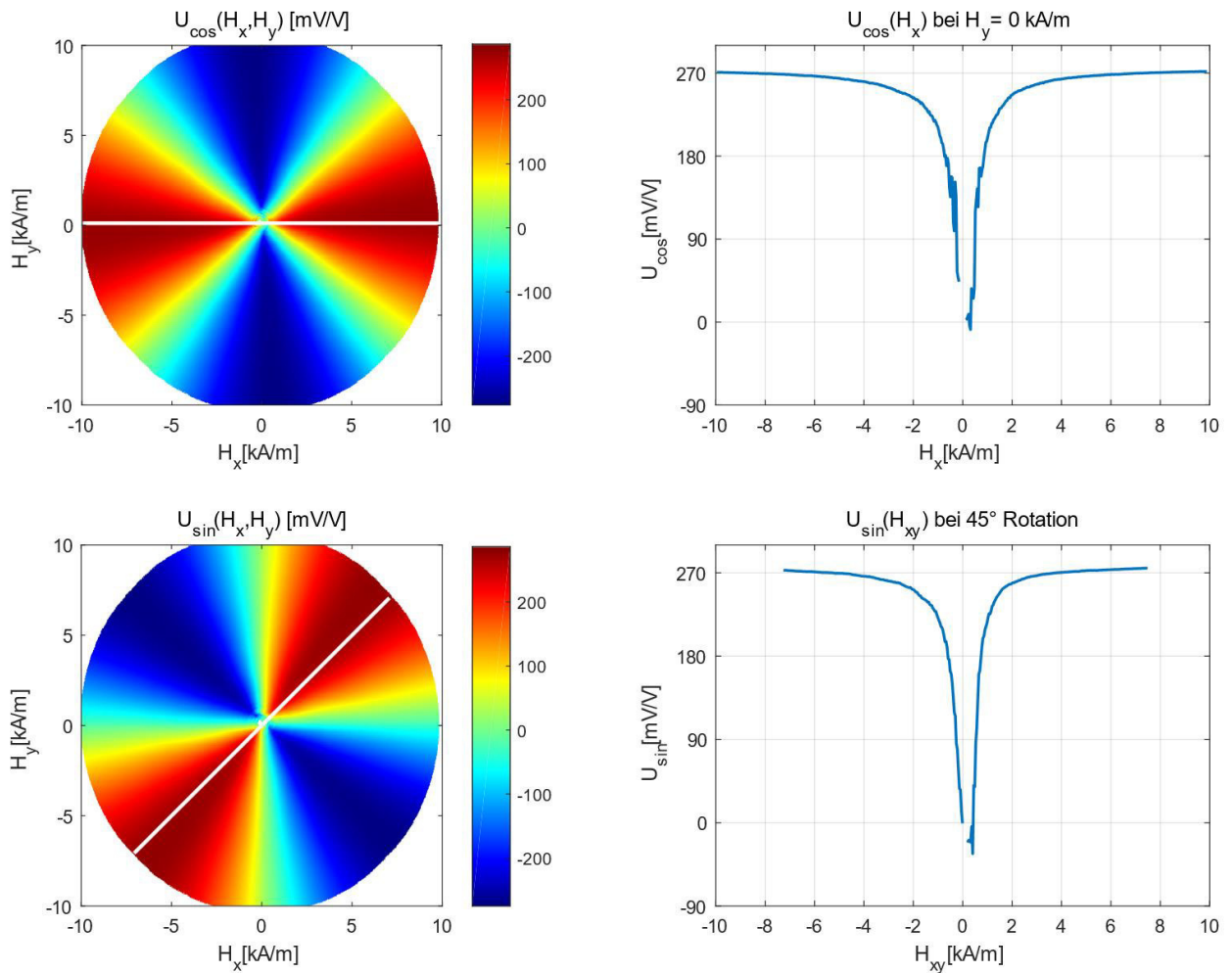


Abbildung 38: Drehfeldaufnahme für KMZ60 von NXP

In den oberen rechten und unteren rechten Diagramme sind die Kurven von $U_{\sin}(H_{XY})$ - und $U_{\cos}(H_X)$ in zwei Bereiche zu unterscheiden. Ein annähernde lineare Ansteigung von 0 bis $\pm 0,75$ kA/m und eine Querlinie mit geringer Steigung ab ± 3 kA/m. Der komplette Sättigungsbereich kann mit dem Einsatz eines stärkeren Leistungsverstärkers von 7,6 A Stromfluss gezeigt werden.

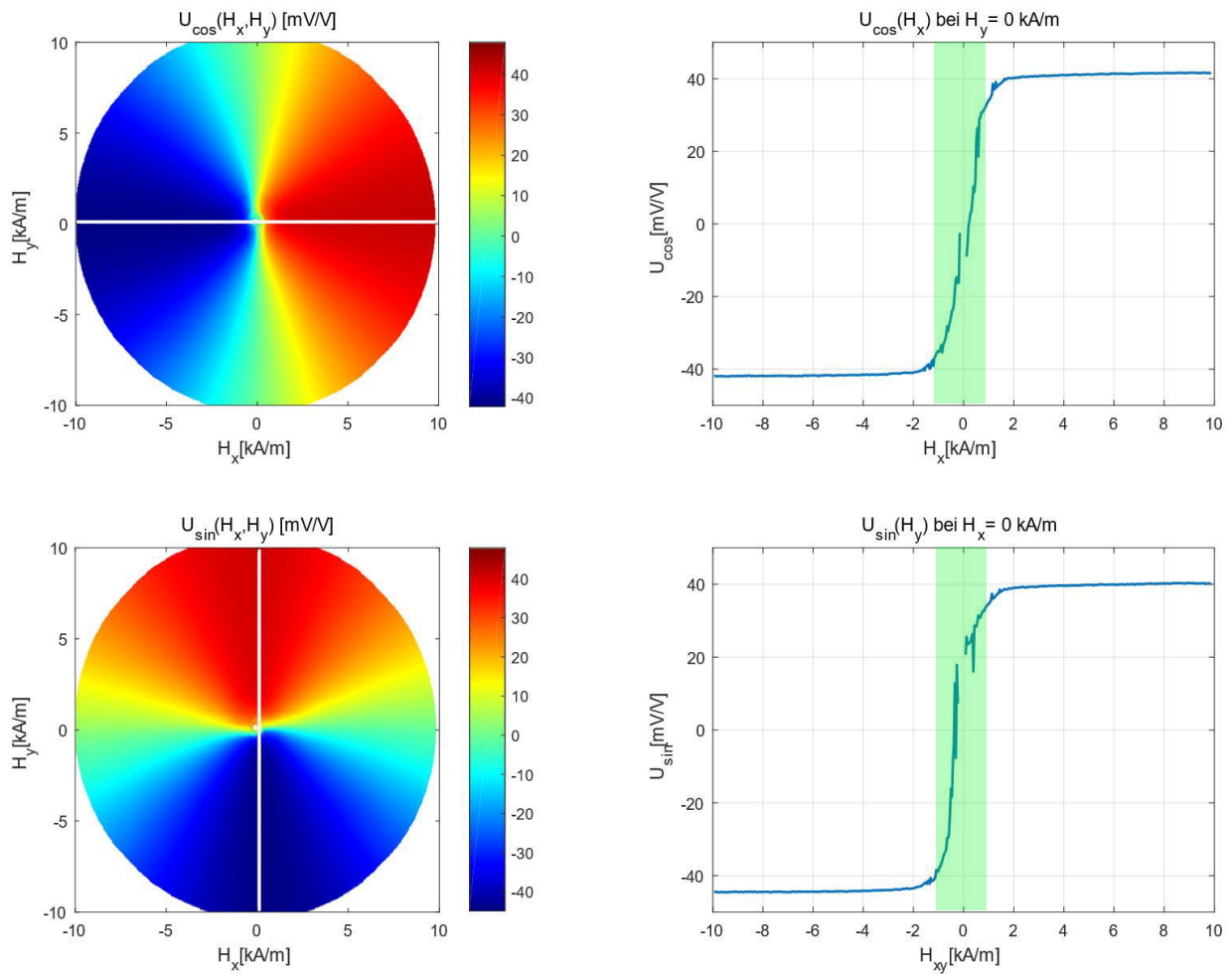


Abbildung 39: Drehfeldaufnahme für AAT001-10E-Winkelsensor von NVE

In dem Kurvenverlauf von $U_{\cos}(H_X)$ und $U_{\sin}(H_{XY})$ erreicht den NVE-Winkelsensor ab ± 7 kA/m seine Sättigungsgrenze. Der Verlauf der Kurven in $U_{\cos}(H_X)$ und $U_{\sin}(H_{XY})$ zwischen ± 7 kA/m und ± 3 kA/m ist annähernd querlinear zu erkennen. In dem grünen Bereich verlaufen die Kurven von 0 bis ± 1 kA/m annähernd linear.

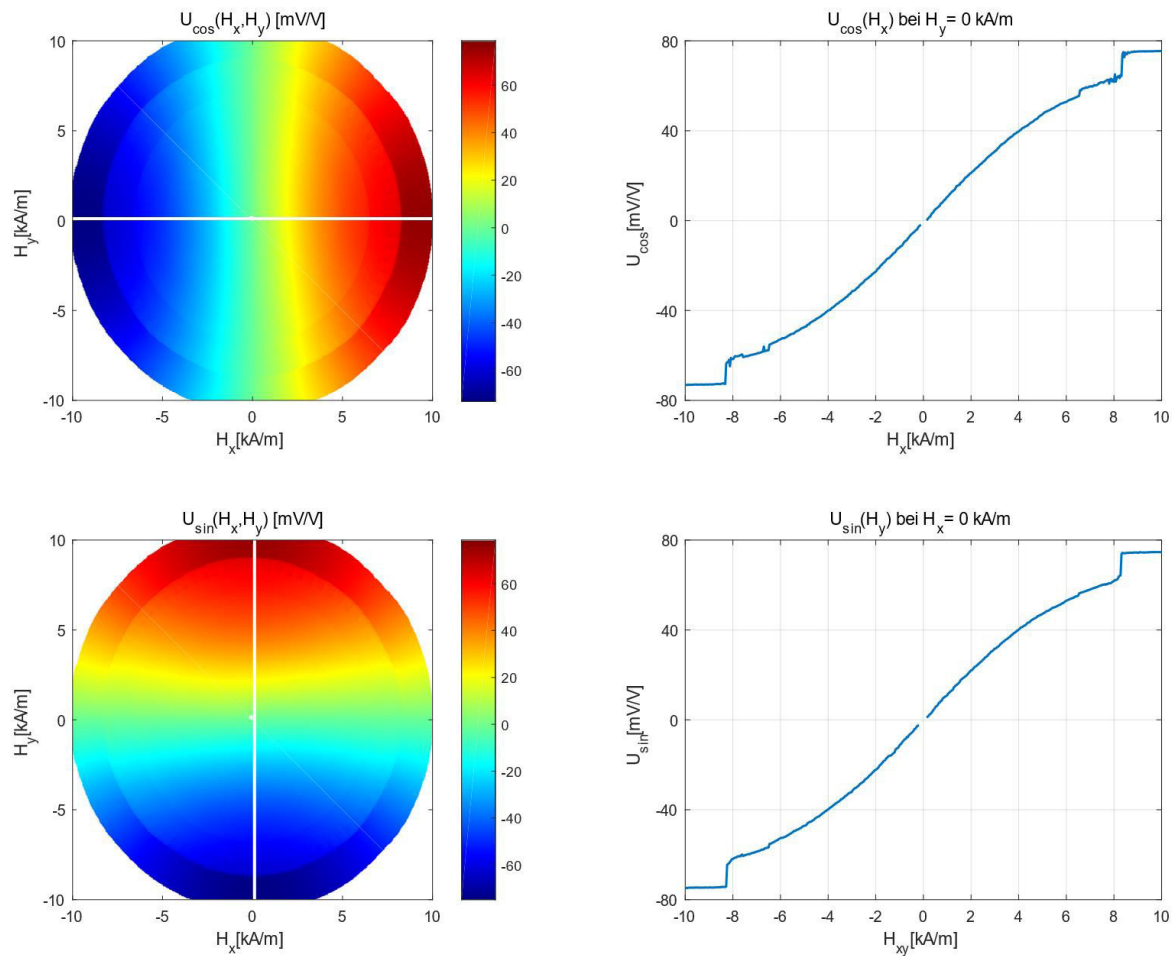


Abbildung 40: Hysterese Bereich des TAS2141-AAAB-Winkelsensors von TDK

Es ist zu identifizieren in dem Kurvenverlauf von $U_{\cos}(H_X)$ und $U_{\sin}(H_{XY})$, dass ein Sättigungszustand der TDK-Winkelsensor bei $\pm 8,3$ kA/m und m in der $U_{\sin}(H_{XY})$ bei $\pm 8,8$ kA/m erreicht wurde. Der Verlauf der Kurven in $U_{\cos}(H_X)$ und $U_{\sin}(H_{XY})$ von 0 bis ± 8 kA/m ist annähernd linear.

In den Abbildungen 40 bis 42 ist zu erkennen, dass eine Messung der Hysterese sowie die Sättigungsbereiche bei einer magnetischen Feldstärke von ± 12 kA/m möglich sind. Bei dem Vergleich mit den Hersteller-Datenblättern stimmen die gemessenen Werte mit den realen fast überein, etwa $0,1^\circ$. Um die ganze Sättigungsbereich zu sehen muss eine magnetische Feldstärke von ± 20 kA/m erzeugt, indem ein Stromfluss von 7,6 A in dem Kreuzluftspulenmessplatz durchfließt werden.

Dank der unten verbauten Lüfter wird bei der Messung eine maximale Temperatur von 40°C erreicht. Auch die Bauform der Kegelluftspule sowie der Spulenbox hat viel bei der Wärmeabfuhr geholfen, da die Spule aus drei Teilen gebaut ist und die Box mehr und größere Löcher als der Klein-Feld-Kasten hat.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wurde zunächst ein neuer Kreuzspulenmessplatz für die Messung von verschiedenen magnetischen Winkelsensoren entworfen und gefertigt. Der neue Messplatz besteht ausschließlich aus dia- und paramagnetischen Materialien, um den Hysteresebereich der Winkelsensoren genauer untersuchen zu können. Das Spulensystem besteht aus zwei Spulenpaaren, die Magnetfelder in der X- und Y-Achse aufbauen. Durch die kreuzförmige Anordnung der Spulen entstehen im Zentrum des Messplatzes homogene Magnetfelder. In der Mitte der Spulenbox wird ein Winkelsensor eingebracht und präzise in der Mitte des Messraums positioniert. Der Prüfling kann dabei in drei Achsen verschoben werden.

Die Verbindung und die Steuerung der verwendeten Geräte erfolgten über die USB-Schnittstelle. Die gewünschten Einstellungen für das Oszilloskop und den Funktionsgenerator sowie die Messdurchläufe werden durch MATLAB eingestellt und an die Geräte gesendet. Die H-Brücken eines Spulenpaars werden mit den verwendeten Leistungsverstärkern verbunden, die an den Spulen angeschlossen sind. Wegen der entstehenden Wärme wurden vier Lüfter im Boden der Spulenbox eingebaut. Die Spulen können beschädigt werden, wenn die Wärme extrem hoch ist, da sie aus PLA gefertigt worden. Mit dem neuen Kegelluftspulenmessplatz kann eine Messung mit einer Feldstärke von ± 12 kA/m durchgeführt werden. Nach der Installation wurde der Mittelpunkt in dem Messraum ermittelt und dann der Spulenfaktor der beiden Spulenpaare ermittelt.

Mithilfe der Shuntwiderstandsbox werden die Spannungen am Oszilloskop gemessen und dargestellt. Die aufgenommenen Dateien werden durch den PC gespeichert, durch ein Skript verarbeitet und schließlich das Kennfeld erstellt. Bei der Messung des Kennfeldes hat der Winkelsensor von TDK ein klares Ergebnis gezeigt. Im Gegensatz dazu, waren die Kennfeldbilder des NVE-Winkelsensors unbefriedigend.

Alle untersuchten Winkelsensoren zeigten ausgeprägte Hystereeffekte. Die Sättigungsbereiche der Winkelsensoren wurden auch bei der Messung der Hysterese ersichtlich, allerdings kann der komplette Sättigungsbereich erst bei größeren magnetische Feldstärken dargestellt werden.

5.2 Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Die Ergebnisse können in anschließenden Arbeiten untersucht und weiterentwickelt werden. Der erstellte Messplatz kann in Zukunft auch mit größeren Strömen betrieben und getestet werden.

Es wäre sinnvoll, wenn die gefertigten Spulenboxen zuerst mittels MATLAB oder Excel simuliert mit den Werten der existierenden Spulenboxen verglichen würden. Hierdurch kann der Spulenmessplatz genau für die benötigten Messungen ausgelegt werden, es können besser

passende Simulationsprogramme erstellt und somit zutreffenderen Ergebnissen gewonnen werden, da die berechnete mit den simulierten Werte in dieser Arbeit stammen nicht überein.

Aluminium wäre als Material für den Spulenkörper besser geeignet als der verwendete PLA-Kunststoff. Aluminium hat eine deutlich höhere Schmelztemperatur (660,3 °C) als PLA (185,5 °C) und leitet die Abwärme der Spule wesentlich besser ab. Daher kann ein kleinerer Kupferdrahtdurchmesser zur Bewicklung der Spulen sowie eine größere Wicklungszahl verwendet werden, sodass die gewünschte Feldstärke von 20 kA/m leichter erreicht werden kann.

Ein verbessertes Modell der Kegelluftspule, das bis zu 3813 Windungen bei 0,8 mm Kupferdrahtdurchmesser nutzt, wurde entworfen (siehe Abbildung 41 b). Wegen der hohen Wicklungszahl sollte die Bewicklung automatisch und präzise mit einer Wickelmaschine durchgeführt werden.

Der Spulenfaktor kann genau und automatisch ermittelt werden, indem Schrittmotoren in dem Messplatz eingesetzt werden. Dabei muss auch ein MATLAB-Skript zur Vermessung des Feldes vorbereitet werden.

Bei der Softwareauswertung der Kennfelddarstellung sollten besser kleine Dateigrößen genutzt werden, da bei den derzeit sehr großen Dateien bis zu 5 Gbyte während der Bearbeitung Speicherprobleme auftreten. Bei der Auswertung einer kleinen Datei kann zuerst ein Originalwert gelesen und das dazugehörige Kennfeld erzeugt werden. Dieser Rohwert wird gelöscht und der zweiten Originalwert wird mit demselben Verfahren bearbeitet. Wenn ein Rohwert mit einem anderen Rohwert übereinstimmt, wird der Mittelwert der beiden Rohwerte ermittelt und die beiden Originalwerte ersetzt. Dieser beschriebene Algorithmus soll bis zum letzten Rohwert rechnen und anschließend das Kennfeld darstellen. Hierdurch kann die Belastung auf das PC-RAM erheblich verringert werden, wenn die aufgenommenen Dateien kleiner als 200 Mbyte sind.

Die Verbesserungsvorschläge sind wie folgt zusammengefasst:

- Die magnetischen Winkelsensoren KMZ, NVE und TDK sollten mit einer magnetischen Feldstärke von ± 20 kA/m erneut getestet werden.
- Die resultierenden schrägen Kennfelder bei dem Winkelsensor von NVE sollen weiter untersucht werden.
- Die Algorithmen zur Verarbeitung der aufgenommenen Dateien können optimiert werden, um die Kennfelderstellung bei großen Dateien einwandfrei zu verarbeiten.
- Es wurde ein neues Spulenmodell mit 3813 Windungen (je Spule) mithilfe von FreeCAD entworfen, dazu noch eine Berechnung von Excel durchgeführt, um eine minimale magnetische Feldstärke von ± 20 kA/m bei einem Stromfluss von 5 A und bis zu ± 50 kA/m bei einem Stromfluss von 10 A zu erzeugen, sodass eine vollständige Untersuchung eines Winkelsensors in einem Messplatz durchgeführt werden kann. Es wird auch empfohlen, den Wickelkörper aus Aluminium zu fertigen, da die abgegebene Wärmeleistung sehr hoch ist.
- Eine erneute Methode zur Vermessung des Spulenfaktors kann mit dem Einsatz von Schrittmotoren entwickelt werden

Zum Schutz der Leistungsverstärker sollen Leistungsdioden verwendet werden. Diese Dioden erlauben den Stromfluss nur in einer Richtung. Für eine genaue Sensorplatzierung wurde ein Platzierungswerkzeug entworfen, siehe Abbildung 41 a.

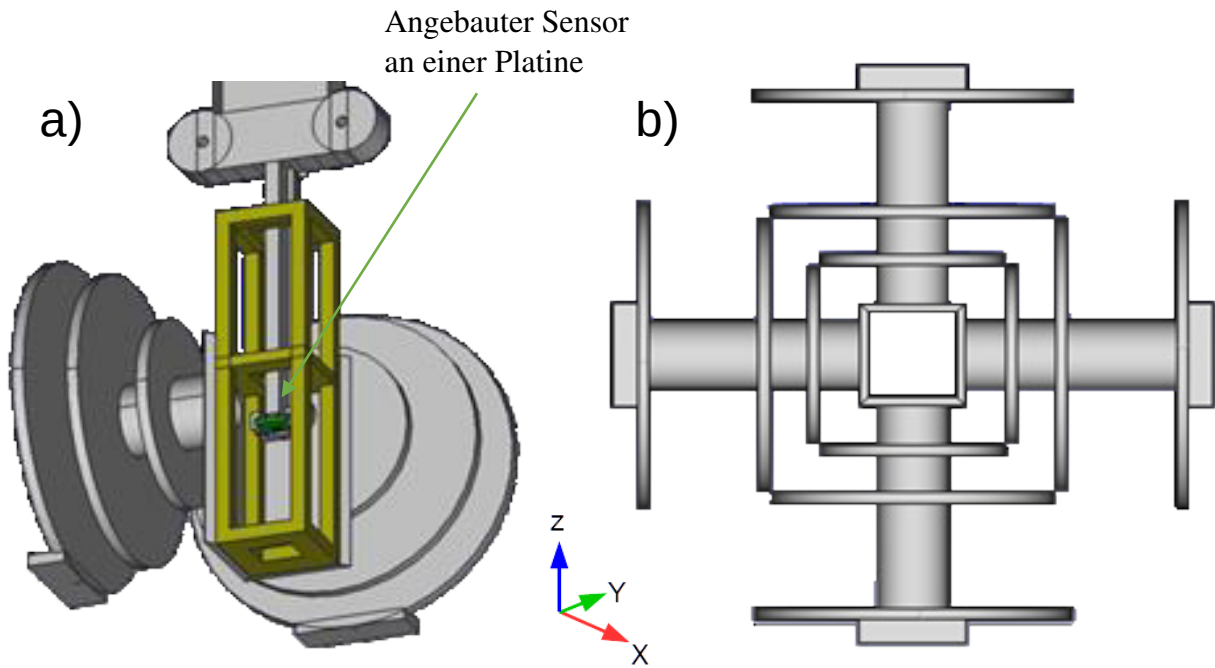


Abbildung 41: a) Platzierungswerkzeug für eine genaue Positionierung des Sensors. b) verbessertes Modell von Kegelkreuzspulen

Literaturverzeichnis

- [1] F. Siebenmorgen, „Ansteuerelektronik und Mikrocontrollersteuerung,“ HAW, Hamburg, 2009.
- [2] S. Zippel, „Analyse des magnetischen Systems eines ABS-Sensors - Feldsimulation, automatisierte Kennfeldmessung, Signalsynthese -,“ HAW, Hamburg, 2011.
- [3] M. Krey, „Systemarchitektur und Signalverarbeitung für die Diagnose von magnetischen ABS-Sensoren,“ HAW, Hamburg, 2015.
- [4] Holleman-Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, New York , Berlin: Walter de Gruyter , 1995 .
- [5] „Magnetische Hysterese,“ [Online]. Available: <http://home.uni-leipzig.de/prakphys/pdf/VersuchePhy/E-Lehre/E-06-AUF.pdf>. [Zugriff am 21 12 2018].
- [6] P. Dobrinski, G. Krakau und A. Vogel, Physik für Ingenieure, Deutschland: Springer-Verlag, 2013.
- [7] O. Radler, E. Kallenbach, R. Eick, T. Ströhla, K. Feindt und M. Kallenbach, Elektromagnete, Springer Vieweg, 2017.
- [8] F. -J. Schmitt, „Glossar: Magnetismus von A-Z,“ Webcraft AG, Gottmadingen, 2015.
- [9] B. Halbedel, „Magnetische Eigenschaften der Materialien,“ Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2014.
- [10] C. Röhr, „Magnetmaterialien,“ AGP Begleitvorlesung, 2017.
- [11] R. Gross und A. Marx, „Spinabhängiger Transport,“ Walther-Meißner-Institut.
- [12] S. Tegen, „Einfluß der Dipolkopplung auf den Tunnelmagnetowiderstand in Schichtsystemen und strukturienten Elementen,“ Technischen Universität Dresden, Dresden, 2001.
- [13] H. Lemme, „Messung durch den Tunnel,“ Elektronik, 19 08 2016. [Online]. Available: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/messen-testen/messung-durch-den-tunnel-133265.html>. [Zugriff am 21 09 2018].
- [14] „AAT00x Ultralow Power TMR Angle Sensors,“ NVE Corporation, USA, 2017.
- [15] H. Yamazaki, H. Hirabayashi, N. Oyama und M. Sakai, „Characteristics of TMR Angle Sensors,“ TDK CORPORATION, Japan, 2011.
- [16] R. Slatter, „Tunnelmagnetoresistive Sensoren für die Antriebstechnik,“ 2017. [Online]. Available: https://www.koerber-automation.com/fileadmin/sensitec/About_Sensitec/Public_Relations/Expert_Publications/SENSITEC_PN-2017-07_TMR-Technologie_von_Sensitec_DE.pdf. [Zugriff am 11

11 2018].

- [17] A. Zweck, VDI-Technologiezentrum, [Online]. Available: <https://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/40.pdf>. [Zugriff am 11 11 2018].
- [18] „KMZ60 Angle sensor with integrated amplifier,“ NXP (Product data sheet), Hamburg, 2014.
- [19] TDK, „TMR Angle Sensor TAS series,“ TDK (Product data sheet), USA, 2017.
- [20] „Leifiphysik,“ [Online]. Available: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitatslehre/magnetisches-feld-spule/versuche>. [Zugriff am 12 11 2018].
- [21] T. Schütte, *Persönlicher Kontakt*, HAW-Hamburg, 2018.
- [22] G. Bertotti und I. D. Mayergoyz, *The Science of Hysteresis: Mathematical modeling and applications*, Academic Press, 2006.

Abbildungsverzeichnis

STRUKTUR DER VORGEHENSWEISE IN DIESER BACHELORARBEIT.....	3
HYSTERESEKURVE BEI VERSCHIEDENEN MATERIALIEN. A) WEICHMAGNETISCHER MATERIAL KLEINE KOERZITIVFELDSTÄRKE < 1 kA/M; B) HARTMAGNETISCHER MATERIAL GROßE KOERZITIVFELDSTÄRKE > 10 kA/M; C) RECHTECK-HYSTERESEKURVE, REMANENZFLUSSDICHTE \cong SÄTTIGUNGSFLUSSDICHTE [5] MODIFIZIERT.....	6
DARSTELLUNG DER SPIN-RICHTUNGEN IN VERSCHIEDENEN WERKSTOFFEN [10].....	9
FUNKTIONSWEISE EIN AMR-SENSOR UND SEINE RESULTIERENDE WIDERSTANDSÄNDERUNG.....	11
STRUKTURAUFBAU EINES AMR-WINKELSENSORS [8] MODIFIZIERT.....	11
FUNKTIONSPRINZIP DES TMR-EFFEKTS.....	12
AUFBAU DES MAGNETORESISTIVEN TMR-EFFEKTS.....	13
STRUKTURKONZEPT DES TMR-EFFEKTS.....	14
2 WHEATSTONE'SCHEN-HALBBRÜCKEN [14] MODIFIZIERT.....	14
2 WHEATSTONE'SCHEN-VOLLBRÜCKEN [15] MODIFIZIERT.....	15
IMPLEMENTIERTE OSZILLOSKOP-AUFRUFFUNKTION IN MATLAB-CODE.....	19
AUFBAU DES KREUZSPULENMESSPLATZES ZUR VERMESSUNG VON 2D-MAGNETISCHEN-SENSOREN NACH RIEMSCHEIDER UND KREY [3].....	20
DER MESSPLATZ UND DIE VERWENDETEN GERÄTE.....	21
FUNKTIONSPRINZIP DER HELMHOLTZ-SPULE [20].....	22
ANSCHLUSSPLATINE ZUM VERBINDEN DER WINKELSENSOREN.....	22
SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES WICKELRAUMS BEI EINER ZYLINDRISCHEN SPULE MIT ANGABEN DER BENÖTIGTEN PARAMETER FÜR DIE BERECHNUNG DER WICKLUNGSZAHL.....	25
3D-MODELL DER ZYLINDRISCHEN KREUZLUFTSPULE.....	26
DER NEUE ENTWURF DER KREUZFÖRMIGEN KEGELLUFTSPULEN.....	27
BEWICKLUNG EINER SPULE PER HAND.....	28
FELDSTÄRKESIMULATION; DER ROTE PUNKT STELLT DEN SENSORPLATZT DAR.....	29
FELDSTÄRKE IM SPULENMESSPLATZ MIT DEN EINGEZEICHNETEN BEREICHEN DES MESSRAUMS UND DER SPULEN.....	30
A) DAS MODELL DER KEGELLUFTKREUZSPULE; JEDE SPULE IST IN 3 TEILE GETEILT B) DIE ANSCHLUSSBOX DER SPULEN.....	31
BEWICKELTE KREUZLUFTSPULEN ZUR STABILISIERUNG ANGEORDNET IN EINEM HOLZBOX.....	32
LÜFTUNG IM BODEN DES KREUZSPULENKASTENS.....	32
UNTERSUCHUNGSFELD FÜR DEN MITTELPUNKT DER KEGELKREUZLUFTSPULE.....	34
VERLAUF DER STUFENFÖRMIGEN ANREGUNGSFUNKTION.....	35
3D-CAD MODELL DER HALTUNG FÜR DIE MESS-SONDE DES GAUß-METER.....	36
SHUNTWIDERSTÄNDE ZUSAMMENGESETZT AUS JE VIER PARALLELGESCHALTET 1 Ω LEISTUNGSWIDERSTÄNDE.....	37
SIMULATION DER MAGNETFELDINTENSITÄT DES KEGELLUFTMESSPLATZES. DER SENSOR WIRD IN DEM QUADRAT IN DER MITTE DES MESSRAUMS EINGEBRACHT. IN DER SIMULATION WIRD EIN 135° GEDREHTES MAGNETFELD DARGESTELLT.....	39
FEHLERMELDUNG BEI DER KENNFELDDARSTELLUNG EINER MESSDATEI GRÖßER ALS 5 GB.....	40
SPANNUNGSVERLAUF VON ZWEI DREIECKFÖRMIGEN SIGNALEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN FREQUENZEN NACH ZIPPEL UND KERY.....	41
EXEMPLARISCHE KENNFELDDARSTELLUNG NACH ZIPPEL UND KERY.....	41
VERLAUF DER ANREGUNGSSPANNUNG FÜR DEN EISENKREUZSPULENMESSPLATZ MIT KLEINEN FREQUENZEN.....	43
VERLAUF DER ANREGUNGSFUNKTIONEN DER DREHFELDERREGUNGSSPANNUNG MIT VOR- UND RÜCKWÄRTSVERLAUF BEI 180°.....	43
EXEMPLARISCHER DARSTELLUNG DES VERLAUFES DER EIN- UND AUSGANGSPANNUNGEN IM OSZILLOSKOP.....	44
ERZUGTE STEIGENDE UND FALLENDE FELDER VON H_x UND H_y STELLEN KENNFELDER FÜR 4 VERSCHIEDENE FÄLLE DAR (TDK-SENSOR).....	46
DARSTELLUNG DER V-H-KENNLINIE FÜR 4 VERSCHIEDENE FÄLLE MIT MITTELWERT, WOBEI „R“ FÜR STEIGEND STEHT UND „F“ FÜR FALLEND (TDK-SENSOR).....	46
DREHFELDAUFNAHME FÜR KMZ60 VON NXP.....	49
DREHFELDAUFNAHME FÜR AAT001-10E-WINKELSENSOR VON NVE.....	50

HYSTERESE BEREICH DES TAS2141-AAAB-WINKELSENSORS VON TDK.....	51
A) PLATZIERUNGSWERKZEUG FÜR EINE GENAUE POSITIONIERUNG DES SENSORS. B) VERBESSERTES MODELL VON KEGELKREUZSPULEN	54
GESAMTE 3D-DARSTELLUNG DES KEGELLUFTSPULENMESSPLATZES	59
PARALLELANSCHLUSS, UM EIN HOMOGENES MAGNETISCHES FELD IN MITTE DES MESSRAUMS ZU ERHALTEN.....	60

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERGLEICH ZWISCHEN AMR- UND TMR-TECHNOLOGIE [16] [17]	17
TABELLE 2: SPEZIFIKATION DER BETRACHTETEN WINKELSENSOREN [14] [18] [19]	17
TABELLE 3: ÜBERSICHT DER VERFÜGBAREN SPULENKÄSTEN.....	23
TABELLE 4: THEORETISCHER VERGLEICH DER KUPFERDRAHTDURCHMESSER (OHNE ISOLATION) IN DER KEGELLUFTSPULE	27
TABELLE 5: VERGLEICH DER THEORETISCHEN WERTEN MIT DEN REALEN WERTEN	33
TABELLE 6: VERGLEICH DER ERZEUGTEN FELDSTÄRKE BEI VERSCHIEDENEN STROMWERTEN.....	33
TABELLE 7: SPULENFAKTORMESSUNG DER X-ACHSE.....	35
TABELLE 8: SPULENFAKTORMESSUNG DER Y-ACHSE.....	36

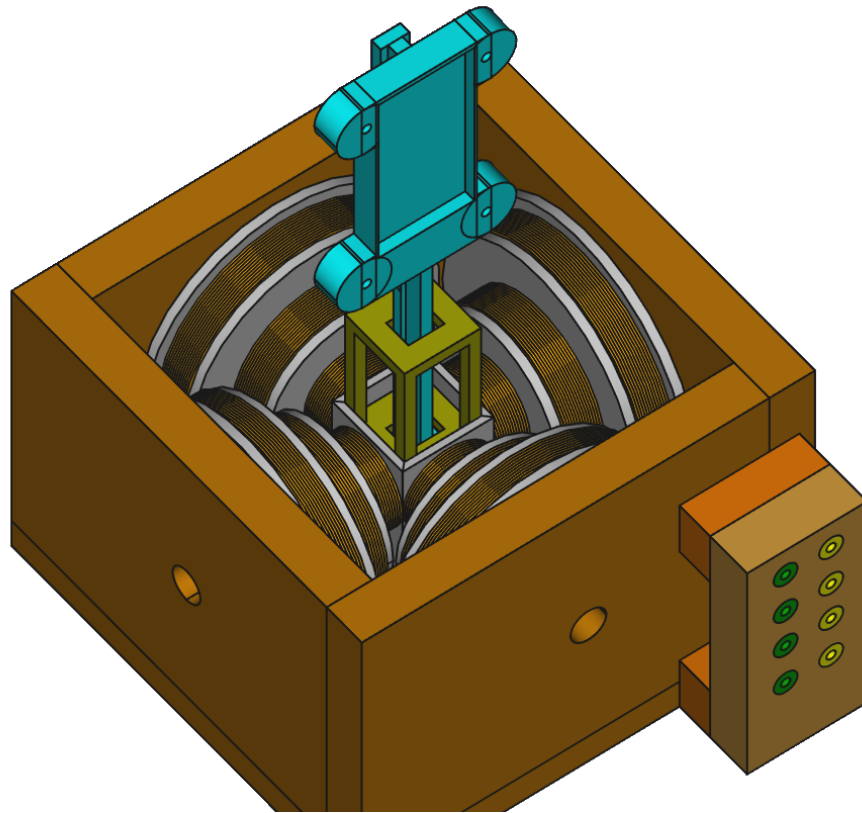
Anhang A: Eine kurze Anleitung für den neuen Messplatz:

Abbildung 42: Gesamte 3D-Darstellung des KegelLuftspulenmessplatzes

Im Abbildung 45 ist der gesamte Luftkreuzspulenmessplatz zu sehen. Dieses Modell wurde mit FreeCAD konstruiert. An der Box befindet sich ein Anschlussblock. Dieser Anschlussblock dient zur freien Auswahl der Eingänge, die Kabelanschlüsse erfolgen wie im Abbildung 46. Der gesamte Schaltungsaufbau sowie die Funktionsweise sind in Kapitel 3 zu finden.

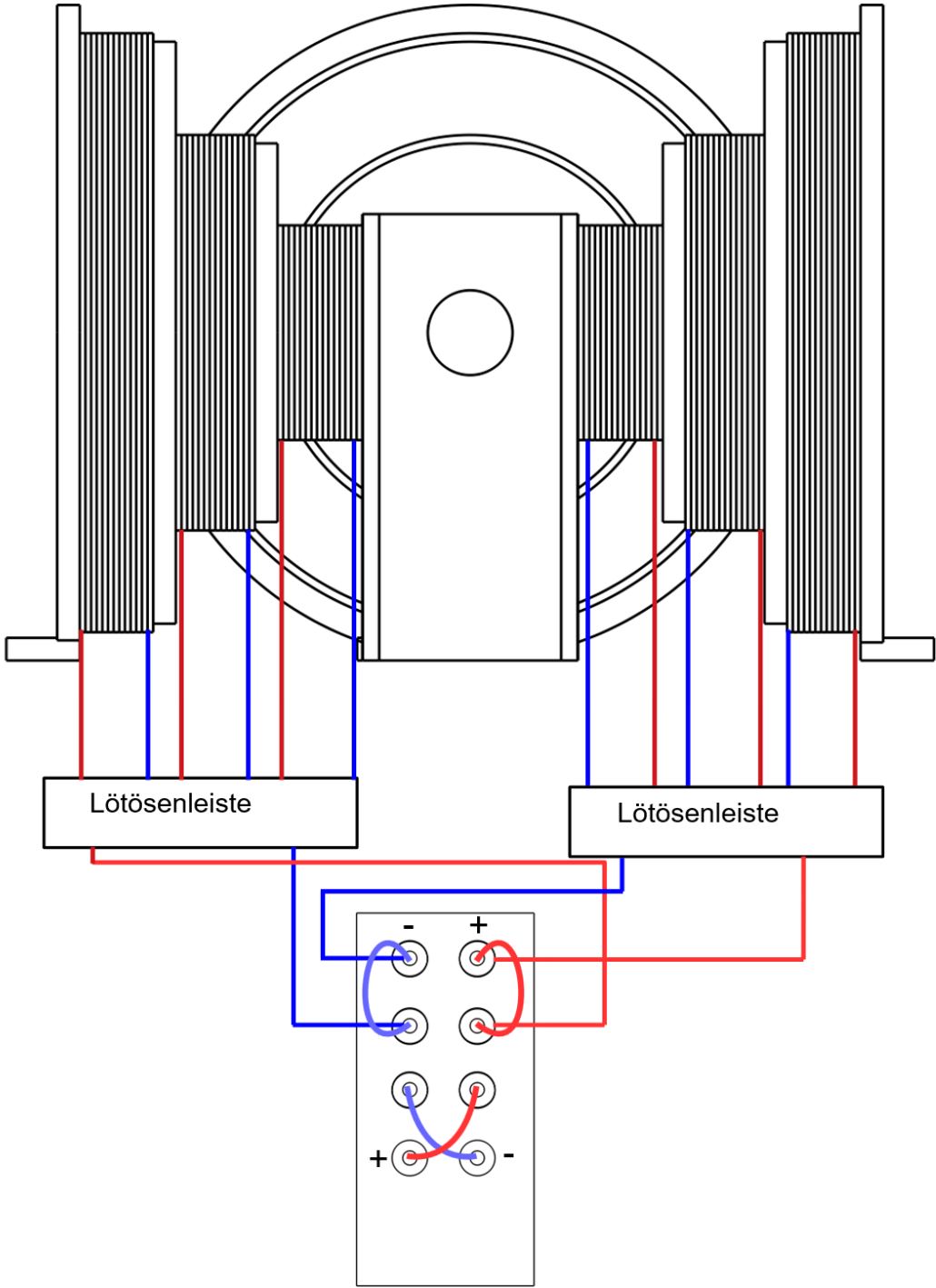


Abbildung 43: Parallelanschluss, um ein homogenes magnetisches Feld in Mitte des Messraums zu erhalten

Anhang B: Aufgabenstellung

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Department Informations- und Elektrotechnik
Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider



18. September 2018

Bachelorthesis Ahmed Albounyan

Charakterisierung magnetischer Winkelsensoren mittels Kreuzspulenmessplatz

Motivation

Magnetische Sensoren haben in der Automobilelektronik eine hohe Bedeutung. Sie werden für die berührungslose Erfassung von Drehzahlen und Winkelinformationen verwendet. Sie kommen beispielsweise in der Motorelektronik, im Bremssystem und im Komfortbereich vielfältig zum Einsatz.

Die HAW Hamburg arbeitet in Kooperation mit Partnern an dem Forschungsprojekt „ISAR Signalverarbeitung für Integrated Sensor-Arrays basierend auf dem Tunnel-Magneto-resistiven Effekt für den Einsatz in der Automobilelektronik“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird. In dem Projekt soll eine maßgeschneiderte Signalverarbeitung und die Systemarchitektur für die nächste Generation von magnetischen Sensoren – Sensor-Arrays – entwickelt werden.

Mit dem Sensor-Array ist die Erfassung des Magnetfelds eines Permanentmagneten möglich, dessen räumliche Lage die Nutzinformation darstellt. Mit dem Array wird Fehlerkorrektur für diese Nutzinformation möglich. Außerdem wird eine Detektion und Kompensation von Störfeldern angestrebt.

Ziele

In der Bachelorarbeit von Herrn Ahmed Albounyan sollen magneto-resistive Winkelsensoren charakterisiert und deren Verhalten gegenübergestellt werden. Für die Messungen mit einem Kreuzspulenmessplatz stehen aus dem Projekt ein AMR-Sensor und zwei TMR-Sensoren zur Verfügung. Damit die Sensoren auch bei kleinen Feldstärken, in einem Bereich von 12 ... 20kA/m, vollständig charakterisiert werden können, soll ein Messplatz mit Luftspulen konstruiert und gefertigt werden. Neben dem Aufbau erfolgen die Inbetriebnahme und die Messung des Spulenfaktors, welcher für die Berechnung des magnetischen Feldes notwendig ist. Für Feldstärken bis ca. 80kA/m steht ein Messplatz mit Eisenkernspulen bereit. Dieser kann für Kennfelder und Kennlinien eingesetzt werden.

Aufgabenstellung

Herr Ahmed Albounyan soll in der Bachelorarbeit folgende Arbeitspakete behandeln:

1. Einarbeitung
 - Brückenstruktur von XMR Sensoren (Winkelsensoren)
 - Funktionsweise des Kreuzspulenmessplatzes
 - Inbetriebnahme des Messplatzes

2. Software

- Übernahme der Auswerte und Ansteuerungsfunktionen aus vorherigen Arbeiten
- Software zur Ansteuerung des Gauß-Meters für die Spulenfaktor-Messung Anpassung der Matlab-Skripte zur Datenaquise für Winkelsensoren
- Entwurf unterschiedlicher Anregefunktionen (Zirkular, Rampenförmig, ...)

3. Hardware und Messplatz

-
- Übernahme der vorhandenen Messplätze (Luft- und Eisen-Spulenmessplatz)
- Überlegungen zum Entwurf eines neuen Luftspulenmessplatzes – optimale Spulenform für ein maximales Feld bei $24V_{DC}$
- Wahl einer geeigneten Kühlmöglichkeit, um Überhitzungen vorzubeugen
- Konstruktion und Aufbau des Messplatzes
- Messung des Spulenfaktors für die beiden Spulenpaare
- Inbetriebnahme des Messplatzes

4. Versuchsreihen und Datenerfassung

- Aufnahme der Sensorausgänge und des Eingangsstroms mit dem Oszilloskop
- Aufnahme von Kennlinien und Kennfeldern verschiedener Sensoren
- Kennfelderfassung der TMR-Sensoren und des AMR-Sensors mit dem konstruierten Messplatz

5. Zusammenfassung und Ausblick

- Bewertung der Ergebnisse
- Offene Punkte und Ansätze zur Weiterführung
- Fazit und Beitrag zum Gesamtprojket

6. Anhang

- Kurzbeschreibung der Vorgehensweise: Kurz-Handbuch für den neuen Messplatz
- Messplan und zusammengefasste Ergebnisse – Bilderreihen und Tabellen
- Quelltexte, Konstruktionszeichnungen und Schaltungen

Dokumentation

Die gewählten Lösungen für den Aufbau des Messplatzes sind gut nachvollziehbar und für die zukünftige Nutzung zu dokumentieren. Die realisierten Lösungen und die Ergebnisse sind kritisch zu bewerten. Ansätze für Verbesserungen und für weiterführende Arbeiten sind zu nennen.

Anhang C: MATLAB Code

Skript zur Messungsaufnahme

```

% ksmp_field_meas_air_coil_angle_sensor_VoreingestellteSignale.m
%
%   Beschreibung:
%   Quellcode stammt von Herren Dr. Krey
%   modifiziert und angepasst von Ahmed Albounyan und Thorben Schühte
%=====
%%
%   for m = 1:2
clear all
close all
addpath('functions\')
%% free the scope before reconnect...
try
    fclose(instrfind); delete(instrfind);
catch
    clc
end
clc
%% prescript
% number of measurements
squares      = 03;
% shall the measured data be saved?
do_save      = true;
% number of cricles per part for method 2
parts        = 1;           % number of parts, to avoid vast files
new_per      = squares;
part         = 1;
%=====
%       set voltage of the function generator
%=====
x_voltage_method_1 = 4; % value of the voltage for the x-coils
y_voltage_method_1 = 4; % value of the voltage for the y-coils
%=====
%       set frequency of the function generator
%=====
freq_chan_1      = 0.11;
freq_chan_2      = 0.9;
% freq_chan_1    = 0.001;
% freq_chan_2    = 0.001;
%=====
%       scope max time and number of points
%=====
max_time         = 100;           % 10 times the max time is the oszi time
rec_length       = 5e6;           % points recordlength
%=====
%       external gain if an amplifier used
%=====
external_gain    = 1;           % gain of the instrumental amp.
%=====
% comment = ['Measurement for the active encoder wheel with approx Hy:
%           ' num2str(y_voltage_method_1*1e4) 'A/m'];
%=====
comment = []; % #ok<NASGU>
%% parameters
coil_factor     = 20617;         % [1/m]
% coil_factor   = 2545;

```

```

% coil_factor = 1825;           % [1/m]
kepc_feedback_resistor = 22700; % [Ohm]
shunt_resistor = 0.25;         % [Ohm]
bridge_supply_voltage = 5;     % [V]
% kepc_amp_fact = -kepc_feedback_resistor/4000;

%% specify where what is connected to the scope
% channel 1 and 2: -> coil current x, y direction
coil_current_channels = [1, 2];

% bridge voltages of the angle sensor
bridge_voltage_channels = [3, 4];

%% specify where the coils are connected at the function generator
funcgen_channel_1 = 'x'; % direction for the coils
funcgen_channel_2 = 'y'; % direction for the coils
channel_list = [funcgen_channel_1 funcgen_channel_2];

if channel_list(1) == 'x' && channel_list(2) == 'y'
    channel = [1 2];
elseif channel_list(1) == 'y' && channel_list(2) == 'x'
    channel = [2 1];
else
    error(['wrong channel selection...Check'...
        ' ' 'channel_list' parameter for fixing'])
end
%% Set the setting for the angle sensor
ksmp_measurement_data = struct( 'offset',      {},...
                                'x_coil',      {},...
                                'y_coil',      {},...
                                'bridge_voltage_1', {},...
                                'bridge_voltage_2', {});

ksmp_measurement_data_fresh = ksmp_measurement_data;
%% Starting Capture for angle Sensor
%=====
%     connect the scope
%=====
[interfaceObj_scope, deviceObj_scope] = connect_scope();
%=====
%     connect the function generator
%=====
[interfaceObj_funcgen, deviceObj_funcgen] = connect_funcgen();
faktor = 1; % for a test measure with magnet connected

% setup scope parameters
scope_settings = scope_settings_method_1(true);
deviceObj_scope = scope_settings;

%% Setup for the Scope
if strcmp(deviceObj_scope.Status, 'closed')
    connect(deviceObj_scope)
end
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'timebase', max_time)
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Mode', 'highres')
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Control', 'Single')
set(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint', rec_length)
set(deviceObj_scope.Waveform, 'FirstPoint', 1)
set(deviceObj_scope.Waveform, 'EndingPoint', rec_length)
if strcmp(deviceObj_scope.Status, 'closed')
    connect(deviceObj_scope)
end

```

```

%=====
%       Set scaling for scope channels
%       for angle sensors the offset should be set manually
%=====
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Scale', 500e-3)
set(deviceObj_scope.Channel(2), 'Scale', 500e-3)
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Scale', 100e-3)
set(deviceObj_scope.Channel(4), 'Scale', 100e-3)
%=====
%       Set all channels in run mode for the angle sensor
%=====
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'State', 'on')
set(deviceObj_scope.Channel(2), 'State', 'on')
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'State', 'on')
set(deviceObj_scope.Channel(4), 'State', 'on')
deviceObj_scope = scope_settings;
%% function generator -- frequency and other settings
[funcgen_settings] = funcgen_settings_method_1;
connect(funcgen_settings)
%=====
%       Setup for channel 1
%=====
set(funcgen_settings.Amplitudemodulation(1), 'Enable', 'off')
set(funcgen_settings.Frequency(1), 'Frequency', freq_chan_1);
set(funcgen_settings.Voltage(1), 'Amplitude', x_voltage_method_1/faktor);
set(funcgen_settings.Waveform(1), 'shape', 'ramp');
%=====
%       Setup for channel 2
%=====
set(funcgen_settings.Amplitudemodulation(2), 'Enable', 'off')
set(funcgen_settings.Frequency(2), 'Frequency', freq_chan_2);
set(funcgen_settings.Voltage(2), 'Amplitude', y_voltage_method_1/faktor);
set(funcgen_settings.Waveform(2), 'shape', 'ramp');
% set(funcgen_settings.Phase(2), 'Initiate', 180);
% send the settings
deviceObj_funcgen = funcgen_settings;
cnt = 1;
%=====
%       turn on output of function generator
%=====
% for m = 1 : 10
%%
    wb = waitbar(0, 'Measurement in progress..part1');
    cnt = 1;

    for per = 1:new_per
        ksmp_measurement_data(cnt).x_coil = ...
zeros(1, get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
        ksmp_measurement_data(cnt).y_coil = ...
zeros(1, get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
        ksmp_measurement_data(cnt).bridge_voltage_1 = ...
zeros(1, get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
        ksmp_measurement_data(cnt).bridge_voltage_2 = ...
zeros(1, get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
        cnt = cnt+1;
    end
    cnt = 1;

for per = 1:new_per
    % turn output of funcgen on
    set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'on');
    set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'on');

```

```

% set(funcgen_settings.Frequency(1),'ConcurrentState','on')
waitbar(per/new_per);
ksmp_measurement_data(cnt).offset = 'ramp';
invoke(deviceObj_funcgen, 'trigger');           % start a burst

% wait for scope to capture data
% disp('Scope start singleshot number ... ');
fprintf('Scope start singleshot number %02d... \n',per);
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'state', 'run');
pause(11 * get(deviceObj_scope.Acquisition, 'timebase'));

% turn output of funcgen off
set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'off');

% get the data
[ksmp_measurement_data(cnt).x_coil,ksmp_measurement_data(cnt).y_coil,...
ksmp_measurement_data(cnt).bridge_voltage_1,ksmp_measurement_data(cnt).brid
ge_voltage_2] = ...
scope_capture_ksmp_field_angle_sens2(deviceObj_scope,
coil_current_channels,bridge_voltage_channels);

scope_settings_all(cnt)      = scope_settings;
funcgen_settings_all(cnt)    = funcgen_settings;

% change frequency for function generator
freq_chan_1      = freq_chan_1+0.001;
freq_chan_2      = freq_chan_2+0.001;
set(funcgen_settings.Frequency(1), 'Frequency', freq_chan_1);
set(funcgen_settings.Frequency(2), 'Frequency', freq_chan_2);
if new_per>1

% pause(11 * get(deviceObj_scope.Acquisition, 'timebase'));
pause(1);
end
cnt = cnt+1;
end
% turn off function generator
set(funcgen_settings.Voltage(2), 'concurrent', 'off');
set(funcgen_settings.Frequency(2), 'ConcurrentState', 'off');
set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'Off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'Off');
close(wb);

% send the settings
deviceObj_funcgen = funcgen_settings;

%% Save all collected data to file
if do_save
c = clock;
bridges_recorded = 2;
meas_type = 'ksmp_angle_sens_field_measurement_data';
date_vec = datevec(date);           % get date
for k = 1:99
filename = sprintf('%04d_%02d_%02d_%s_%02d.ksmp2.mat', date_vec(1),
date_vec(2), date_vec(3), meas_type, k);
if( exist(filename, 'file') == 0 )
break;
end
end
save(filename, 'comment','ksmp_measurement_data', 'coil_factor',
'kepc0_feedback_resistor', 'shunt_resistor',...

```



```

        'bridge_supply_voltage', 'bridges_recorded', 'parts',
'part', 'external_gain', 'x_voltage_method_1', 'y_voltage_method_1');
    disp(['Measurement data written to: ' filename])
end
set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'off');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Capture Funktion

```

function [x_coil_current_scope_data, y_coil_current_scope_data,
bridge_voltage_scope_data_1, bridge_voltage_scope_data_2 ]=...
    scope_capture_ksmp_field_angle_sens2(deviceObj_scope,
coil_current_channels, bridge_voltage_channels)

%capture data from Scope
% scope data of current x&y-coils
[x_coil_current_scope_data, temp1,temp2 , temp3] = ...
    invoke(deviceObj_scope.Waveform, 'readwaveform', ['channel'
num2str(coil_current_channels(1))]);
[y_coil_current_scope_data, temp1,temp2 , temp3] = ...
    invoke(deviceObj_scope.Waveform, 'readwaveform', ['channel'
num2str(coil_current_channels(2))]);

% scope data of the bridge voltage
[bridge_voltage_scope_data_1, temp1,temp2 , temp3] = ...
    invoke(deviceObj_scope.Waveform, 'readwaveform', ['channel'
num2str(bridge_voltage_channels(1))]);
% scope data of the bridge voltage
[bridge_voltage_scope_data_2, temp1,temp2 , temp3] = ...
    invoke(deviceObj_scope.Waveform, 'readwaveform', ['channel'
num2str(bridge_voltage_channels(2))]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Skript zur Kennfelddarstellung

```

% field_diagram_statistical_method_analyse.mat
%
% Beschreibung:
% Quellcode stammt von Herren Dr. Krey
% modifiziert und angepasst von Ahmed Albounyan und Thorben Schühte
%=====
%% create sensor field diagram
clear all;
close all;
pause(1)
% [FileName,PathName] = uigetfile('*.ksmp.mat','Select the measurement-
file');
[FileName,PathName] = uigetfile('*.mat','Select the measurement-file');
%
FileNameComp=fullfile(PathName, FileName);
if isempty(FileNameComp)
    disp('Error: no file selected');
    return;
else
    disp(['selected file: ' FileName]);
end
%%
hmax = 50e3;
% dirty but we need the comment

```

```

%load(FileNameComp);
measure.comment=FileName(1:end-4);
VTG = 1; % 1: for cos, 2: for sin
% calculate the field diagrams out of the measurement values
% [hy_axis ,hx_axis, aall, a1, a2, a3,
a4]=field_diagram_statistical_method(FileNameComp);
[hy_axis,hx_axis,...
 aall,a1,a2,...
 a3,a4] = field_diagram_statistical_method_ksmp2(FileNameComp,...
'auto_range',false,'field_dia_square', false,...
'field_dia_x_range', hmax,'field_dia_y_range',hmax,'bridge_num',VTG);
disp_hy_usig_dia = false;
is_function_call = false;
if is_function_call==true
    close(gcf);
end

%% display Hy - Usig curve at specified Hx-field
if( disp_hy_usig_dia == true )
h_fig = figure('Name','Hy to Usig curve');
c=1;
for i=[500 1000 2000 4000]
    % choose hx field strength in kA/m for diagramm
    hx_sel=i;
    % choose nearest value in diagramm
    [dummy, idx]=min(abs(hx_sel-hx_axis));
    subplot(2,2,c);
    x=hy_axis/1000;
    y=aall(idx,:);
    plot(x(7:162), y(7:162));
    axis square; grid on;
    axis([-10 10 -15 15]);
    title(['H_{y} to U_{sig} curve at H_{x}= ' num2str(hx_axis(idx)/1000, 2)
' kA/m']);
    ylabel(' U_{diff} in mV/V');
    xlabel(' H_{y} in kA/m');

    c=c+1;
end
% close all;
curve_stimu(hy_axis, aall(idx,:)', [2000:1000:9000], hx_axis(idx));
end

%% display in one plot manual-scaled
nl = floor(length(aall)/2);
aall2=(aall+10)*(512/20); % scale to 0..512
figure('Name','Hx Hy manual-scaled');
image(hy_axis/1000, hx_axis/1000, aall2);
% hold on;
% line([hy_axis(nl) hy_axis(nl)]./1e3,[xmin
xmax],'color','w','linewidth',1.5,'linestyle','--')
% hold off
colormap(jet(512));
axis square; axis xy;
h=colorbar();
set(get(h,'Title'),'String','U_s [mV/V]')
title(' Hx raising/falling , Hy raising/falling','FontSize',44);
%title([measure.comment '\newline' ' Hy raising/falling , Hx
%raising/falling ']);
xlabel(' Hx [kA/m] \rightarrow','FontSize',32);
ylabel(' Hy [kA/m] \rightarrow','FontSize',32);
set(gca,'FontSize',18);
%% subplot with 4 plots hy/hx rising/falling

```

```

h_fig=figure('Name','Hy/Hx rising/falling');
subplot(2,2,1);
imagesc(hy_axis/1000, hx_axis/1000, a1);
axis square; axis xy;
h=colorbar();
set(get(h,'Title'),'String','U_s in mV/V')
title(' Hx raising , Hy raising ', 'FontSize',20);
xlabel(' H_{x} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
ylabel(' H_{y} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
set(gca,'FontSize',18);
subplot(2,2,2);
imagesc(hy_axis/1000, hx_axis/1000, a2);
axis square; axis xy;
h=colorbar();
set(get(h,'Title'),'String','U_s in mV/V')
title(' Hx raising , Hy falling ', 'FontSize',20);
xlabel(' H_{x} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
ylabel(' H_{y} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
set(gca,'FontSize',18);
subplot(2,2,3);
imagesc(hy_axis/1000, hx_axis/1000, a3);
axis square; axis xy;
h=colorbar();
set(get(h,'Title'),'String','U_s in mV/V')
title(' Hy falling , Hx raising ', 'FontSize',20);
xlabel(' H_{x} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
ylabel(' H_{y} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
set(gca,'FontSize',18);
subplot(2,2,4);
imagesc(hy_axis/1000, hx_axis/1000,a4);
axis square; axis xy;
h=colorbar();
set(get(h,'Title'),'String','U_s in mV/V')
title(' Hx falling , Hy falling ', 'FontSize',20);
xlabel(' H_{x} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
ylabel(' H_{y} [kA/m] \rightarrow', 'FontSize',20);
set(gca,'FontSize',18);
colormap jet
if (exist('suplabel','file') == 2)
    [ax,h]=suplabel([measure.comment ' ( FileName ) '], 't');
    set(h,'interpreter','none');
end

%export_fig(gcf, strrep(FileNameComp, '.ksmp.mat', '_all.png'), 'A4LP');
if is_function_call==true
    close(gcf);
end
xmin = min(hx_axis);
xmax = max(hx_axis);
nl = floor(length(aall)/2);
sc = 60;
figure(6)
if VTG == 1
    subplot(3,1,1)
        imagesc(hx_axis./1e3,hy_axis./1e3,a1),axis
square,set(gca,'YDir','normal')
        hold on
            line([hy_axis(nl) hy_axis(nl)]./1e3,[xmin
xmax], 'color','w', 'linewidth',1.5, 'linestyle','--')
        hold off
        colormap jet
        caxis([-sc sc])

```

```

subplot(3,1,2:3)
    plot(hy_axis,aall(:,nl),'linewidth',5),hold on
    plot(hy_axis,a1(:,nl),'linewidth',2)
    plot(hy_axis,a2(:,nl),'linewidth',2)
    plot(hy_axis,a3(:,nl),'linewidth',2)
    plot(hy_axis,a4(:,nl),'linewidth',2),hold off
    dl = abs(xmin)+xmax;
%     ylim([-sc sc])
    set(gca,'XTick',[xmin:dl/(10-1):xmax])
    set(gca,'XTickLabel',round([xmin:dl/(10-1):xmax]./1e3*100)/100)
    title('V-H-Kennlinnie','FontSize',40)
    ylabel('U_{out2} [mV/V]','FontSize',22)
    xlabel('H [kA/m]','FontSize',22)
    grid on
lgd = legend({'Hy.Hx.Mittelwert','Hy.r.Hx.r','Hy.r.Hx.f','Hy.f.Hx.r' ...
,'Hy.f.Hx.f'},'FontSize',22,'Location','northwest');
    title(lgd,'U-H-Kennlinien','FontSize',22)
    set(gca,'FontSize',18);
    drawnow
    pause(0.02)
else
    subplot(3,1,1)
    imagesc(hx_axis./1e3,hy_axis./1e3,a1),axis square,set(gca,'YDir','normal')
    hold on
    line([xmin xmax],[hy_axis(nl)
hy_axis(nl)]./1e3,'color','w','linewidth',1.5,'linestyle','--')
    hold off
    colormap jet
    caxis([-sc sc])
    subplot(3,1,2:3)
    plot(hy_axis,aall(nl,:), 'linewidth',4),hold on
    plot(hy_axis,a1(nl,:), 'linewidth',2)
    plot(hy_axis,a2(nl,:), 'linewidth',2)
    plot(hy_axis,a3(nl,:), 'linewidth',2)
    plot(hy_axis,a4(nl,:), 'linewidth',2),hold off
    dl = abs(xmin)+xmax;
%     ylim([-sc sc])
    set(gca,'XTick',[xmin:dl/(10-1):xmax])
    set(gca,'XTickLabel',round([xmin:dl/(10-1):xmax]./1e3*100)/100)
    title('V-H-Kennlinnie','FontSize',40)
    %xlabel('H in kA / m','FontSize',022)
    ylabel('U_{out2} [mV/V]','FontSize',22)
    xlabel('H [kA/m]','FontSize',22)
    lgd =
legend({'Hy.Hx.Mittelwert','Hy.r.Hx.r','Hy.r.Hx.f','Hy.f.Hx.r','Hy.f.Hx.f'}
..., 'FontSize',22,'Location','northwest');
    title(lgd,'U-H-Kennlinien','FontSize',22)
    set(gca,'FontSize',18);
    grid on
    drawnow
    pause(0.02)
end
figure(7)
subplot(1,3,1)
    contour(hy_axis,hx_axis,a1),axis square
    % imagesc(hy_axis,hx_axis,a1),axis square
    colormap jet
    caxis([-60 60])
    colorbar
subplot(1,3,2)
    contour(hy_axis,hx_axis,a4),axis square
    imagesc(hy_axis,hx_axis,a4),axis square

```

```

    colormap jet
    caxis([-60 60])
    colorbar
subplot(1,3,3)
    imagesc(hy_axis,hx_axis,(abs(a1-a2))),axis square
    colormap jet
    colorbar
%%
mesh((a1+a2+a3+a4)./4)
caxis([-40 40])
colormap jet
colorbar
%%
ssave = sprintf([FileName(1:10),'_bridgeVoltage%1.0f_all'],VTG);
save( ssave, 'a1', 'a2', 'a3', 'a4', 'aall', 'hx_axis', 'hy_axis')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% generate sensor field diagram for ksmp2 data files
function [hy_axis ,hx_axis, ...
    hy_hx_avg ,hy_r_hx_r ,hy_r_hx_f ,hy_f_hx_r, hy_f_hx_f, ...
    hy_hx_avg_hist ,hy_r_hx_r_hist, hy_r_hx_f_hist, hy_f_hx_r_hist,
hy_f_hx_f_hist]= ...
    field_diagram_statistical_method_ksmp2(filename, varargin)
% options
auto_range = true;
field_dia_square = true;           % only for auto_range
debug = false;
rising_falling_analyse = true; % faster when disabled
% range and resolution for field diagram
field_dia_range = 3e3;           % only valid when auto_range is disabled
% field_dia_resolution = 0501;   % odd values contains zeros
field_dia_resolution = 0201;   % odd values contains zeros
% field_dia_resolution = 401;    % odd values contains zeros
% which signal in meas. data should be used
bridge_num = 1;
% which meas. should be included in field dia.
meas_num = 'all';
% only works when called as function
if exist('varargin', 'var')
    if mod(size(varargin,2), 2)>0
        error('invalid number of arguments');
    end
    for i = 1 : 2 :size(varargin,2)
        switch varargin{i}
            case 'debug'
                debug = (varargin{i+1} > 0);
            case 'auto_range'
                auto_range = (varargin{i+1} > 0);
            case 'field_dia_square'
                field_dia_square = (varargin{i+1} > 0);
            case 'field_dia_x_range'
                field_dia_x_range = varargin{i+1};
            case 'field_dia_y_range'
                field_dia_y_range = varargin{i+1};
            case 'field_dia_resolution'
                field_dia_resolution = varargin{i+1};
            case 'bridge_num'
                bridge_num = varargin{i+1};
            case 'meas_num'
                meas_num = varargin{i+1};
            case 'rising_falling_analyse'
                rising_falling_analyse = (varargin{i+1} > 0);

```

```

        otherwise
            error(['"' varargin{i} '"' ' is an invalid argument']);
        end
    end
end
if iscell(filename)
    filename_vec = filename;
else
    filename_vec = {filename};
end
for i_filename_vec = 1:length(filename_vec)
% for i_filename_vec = 1

    % load data from mat-file
    s{i_filename_vec} = load( filename_vec{i_filename_vec} );
end
% get size of all data
full_data_length = 0;
for i=1:length(s)
    for j=1:length(s{i}.ksmp_measurement_data)
        full_data_length = full_data_length +
length(s{i}.ksmp_measurement_data(j).y_coil);
    end
end
hx = zeros(1, full_data_length);
hy = zeros(1, full_data_length);
sig = zeros(1, full_data_length);
if isfield(s{1}.ksmp_measurement_data, 'bridge_voltage')
    % only one channel available
    bridge_str = 'bridge_voltage';
else
    % two channels available
    % bridge_str = ['bridge_voltage_' num2str(bridge_num)];
    bridge_str = ['bridge_voltage_1'];
end

p1 = 1;
for i=1:length(s)
    for j=1:length(s{i}.ksmp_measurement_data)
        p2=p1+length(s{i}.ksmp_measurement_data(j).y_coil)-1;
        hy(p1:p2) = (s{i}.ksmp_measurement_data(j).y_coil /
s{i}.shunt_resistor) .*s{i}.coil_factor;
        hx(p1:p2) = (s{i}.ksmp_measurement_data(j).x_coil /
s{i}.shunt_resistor) .*s{i}.coil_factor;
        sig(p1:p2) = s{i}.ksmp_measurement_data(j).(bridge_str) ...
/s{i}.external_gain/s{i}.bridge_supply_voltage*1000;
        p1=p2+1;
    end
end
clear('s')
% for angle sensors
sig = sig-mean(sig);

%% auto/manual range for field diagramm
if auto_range
    % parameter for initial search
    field_dia_range_auto_init = 50000;
    field_dia_resolution_auto_init = 500;
    field_dia_res = linspace(-field_dia_range_auto_init,
+field_dia_range_auto_init, field_dia_resolution_auto_init);
    % convert field strength to index in vector field_dia_res
    [hy_hist, hy_idx] = histc(hy, field_dia_res);

```

```

[hx_hist, hx_idx] = histc(hx, field_dia_res);
% only include values > 0
hy_hist_mean = mean( hy_hist(hy_hist>0) );
hx_hist_mean = mean( hx_hist(hx_hist>0) );
hy_used_range = field_dia_res( hy_hist > (hy_hist_mean*0.5) );
hx_used_range = field_dia_res( hx_hist > (hx_hist_mean*0.5) );
if field_dia_square
    field_dia_range_auto_y = max( abs(hy_used_range) );
    field_dia_range_auto_x = max( abs(hx_used_range) );
    field_dia_range_auto = min([ field_dia_range_auto_y
field_dia_range_auto_x ]);
else
    field_dia_range_auto = max([ abs(hy_used_range) abs(hx_used_range)
]);
end
field_dia_range_auto_digits = fix(log10(field_dia_range_auto))+1;
field_dia_range_auto_round_shift = 10^(field_dia_range_auto_digits-2);
field_dia_range_auto =
round(field_dia_range_auto/field_dia_range_auto_round_shift)*field_dia_range_
e_auto_round_shift;

% create new vector with estimated range
field_dia_res = linspace(-field_dia_range_auto, +field_dia_range_auto,
field_dia_resolution);
field_dia_x_res = field_dia_res;
field_dia_y_res = field_dia_res;

% again: convert field strength to index in vector field_dia_res
[hy_hist, hy_idx] = histc(hy, field_dia_res);
[hx_hist, hx_idx] = histc(hx, field_dia_res);
else

% used manual parameters in file head or via varargin
field_dia_x_res = linspace(-field_dia_x_range, +field_dia_x_range,
field_dia_resolution);
field_dia_y_res = linspace(-field_dia_y_range, +field_dia_y_range,
field_dia_resolution);
field_dia_res = field_dia_x_res;

% convert field strength to index in vector field_dia_res
[hy_hist, hy_idx] = histc(hy, field_dia_y_res);
[hx_hist, hx_idx] = histc(hx, field_dia_x_res);
end

% axes scaling
hx_axis = field_dia_x_res;
hy_axis = field_dia_y_res;

% allocate memory
hy_hx_avg_hist = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_hx_avg_sum = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );

% sort vector to matrix
for i=1:length(hy)
    if ~( (hx_idx(i)==0) || (hy_idx(i)==0) )
        hy_hx_avg_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) = hy_hx_avg_hist(hx_idx(i),
hy_idx(i)) + 1;
        hy_hx_avg_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) = hy_hx_avg_sum(hx_idx(i),
hy_idx(i)) + sig(i);
    end
end
end
hy_hx_avg = hy_hx_avg_sum./(hy_hx_avg_hist + 1);

```

```

hy_hx_mean = mean(hy_hx_avg_hist(:));
hy_hx_std = std(hy_hx_avg_hist(:));
disp(['hy_hx_avg quality: ' num2str(hy_hx_mean/hy_hx_std)]);

%% rising/falling field diagramm
% allocate memory
hy_r_hx_r_hist = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_r_hx_f_hist = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_f_hx_r_hist = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_f_hx_f_hist = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_r_hx_r_sum = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_r_hx_f_sum = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_f_hx_r_sum = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
hy_f_hx_f_sum = zeros( length(field_dia_res), length(field_dia_res) );
if rising_falling_analyse

% filter parameters
%   mean_filt_order = 1000;
    mean_filt_order = 50;
    mean_filt_len = mean_filt_order+1;
    mean_filt_grp_del = mean_filt_order/2;

% filtering
    hx_filt = filter(ones(1,mean_filt_len)/mean_filt_len,1,hx);
    hy_filt = filter(ones(1,mean_filt_len)/mean_filt_len,1,hy);

% remove group delay (<mean_filt_order>/2)
    hx_filt = hx_filt(1+mean_filt_grp_del:end);
    hy_filt = hy_filt(1+mean_filt_grp_del:end);

% gradient and sign result:
% positive == rising edge
% negative == falling edge
    hx_grad = sign(gradient( hx_filt ));
    hy_grad = sign(gradient( hy_filt ));

% sort vector to matrix
% signals are valid after <mean_filt_order> samples
for i=1+mean_filt_order:length(hy_grad)
    if ~( (hx_idx(i)==0) || (hy_idx(i)==0) )
        if (hy_grad(i) > 0) && (hx_grad(i) > 0)
            hy_r_hx_r_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_r_hx_r_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) + 1;
            hy_r_hx_r_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_r_hx_r_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) + sig(i);
        elseif (hy_grad(i) > 0) && (hx_grad(i) < 0)
            hy_r_hx_f_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_r_hx_f_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) + 1;
            hy_r_hx_f_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_r_hx_f_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) + sig(i);
        elseif (hy_grad(i) < 0) && (hx_grad(i) > 0)
            hy_f_hx_r_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_f_hx_r_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) + 1;
            hy_f_hx_r_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_f_hx_r_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) + sig(i);
        elseif (hy_grad(i) < 0) && (hx_grad(i) < 0)
            hy_f_hx_f_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_f_hx_f_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) + 1;
            hy_f_hx_f_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_f_hx_f_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) + sig(i);
        end
    end
end

```



```

        %          hy_hx_avg_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_hx_avg_hist(hx_idx(i), hy_idx(i)) + 1;
        %          hy_hx_avg_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) =
hy_hx_avg_sum(hx_idx(i), hy_idx(i)) + sig(i);
        end
    end
end
% normalize
hy_r_hx_r = hy_r_hx_r_sum./(hy_r_hx_r_hist+1);
hy_r_hx_f = hy_r_hx_f_sum./(hy_r_hx_f_hist+1);
hy_f_hx_r = hy_f_hx_r_sum./(hy_f_hx_r_hist+1);
hy_f_hx_f = hy_f_hx_f_sum./(hy_f_hx_f_hist+1);

%% plot hist and avg field
if debug

    figure(300);
    imagesc(field_dia_y_res, field_dia_x_res, db(hy_hx_avg_hist));
    colormap(gray);
    colorbar();
    axis square;
    axis xy;

    figure(400);
    imagesc(field_dia_y_res, field_dia_x_res, hy_hx_avg);
    %imagesc(hy_hx_avg);
    colormap(jet(1024));
    colorbar();
    axis square;
    axis xy;

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Skript zur Drehfeldmessung

```

% Author: Thorben Schueth
% E-Mail: thorben.schueth@haw-hamburg.de
% Date  : 2018.02.27
addpath('functions\')
WT1     = 1.4231; % wait time in single step
WT2     = 1.276; % wait time to next regime
Mend    = 1;
for m = 1 : Mend
clearvars -except m WT1 WT2 Mend
close all
%% free the scope before reconnect...
try
    fclose(instrfind); delete(instrfind);
catch
    clc
end
clc
%% prescript
% number of measurements
squares = 1;
% shall the measured data be saved?
do_save = true;
% number of cricles per part for method 2
parts   = 1; % number of parts, to avoid vast files
new_per = squares;

```

```

part          = 1;
%=====
%      set voltage of the function generator
%      Change Amplitude evry 'm' -- Step
%=====
x_voltage_method_1 = 0.5* 10; % value of the voltage for the x-coils
y_voltage_method_1 = 0.5* 9.3377; % value of the voltage for the y-coils
%=====
%      set frequency of the function generator
%=====
freq_chan_1      = 10e-3-((m-1)./2e3);
freq_chan_2      = 10e-3-((m-1)./2e3);
freq_chan_1      = .5-((m-1)./2e3);
freq_chan_2      = .5-((m-1)./2e3);
%=====
%      scope max time and number of points
%=====
max_time         = 2;           % 10 times the max time is the oszi time
rec_length       = 10e3;       % points recordlength

%=====
%      external gain if an amplifier used
%=====
external_gain    = 1;         % gain of the instrumental amp.
%=====
% comment = ['Measurement for the active encoder wheel with approx Hy:
%           ' num2str(y_voltage_method_1*1e4) 'A/m'];
%=====
comment = []; % #ok<NASGU>
%% parameters
coil_factor_ch1   = 2422.56; % 2674.822; % Spulenpaar 1 & 2 [1/m]
coil_factor_ch2   = 2594.40; %2639.338; % Spulenpaar 3 & 4 [1/m]
kepcos_feedback_resistor = 22700; % [Ohm]
shunt_resistor_ch1 = 0.246; % [Ohm]
shunt_resistor_ch2 = 0.246; % [Ohm]
bridge_supply_voltage = 5; % [V]
% kepcos_amp_fact = -kepcos_feedback_resistor/4000;
%% specify where what is connected to the scope

% channel 1 and 2: -> coil current x, y direction
coil_current_channels = [1, 2];
% bridge voltages of the angle sensor
bridge_voltage_channels = [3, 4];

%% specify where the coils are connected at the function generator
funcgen_channel_1 = 'x'; % direction for the coils
funcgen_channel_2 = 'y'; % direction for the coils
channel_list = [funcgen_channel_1 funcgen_channel_2];

if channel_list(1) == 'x' && channel_list(2) == 'y'
    channel = [1 2];
elseif channel_list(1) == 'y' && channel_list(2) == 'x'
    channel = [2 1];
else
    error(['wrong channel selection...Check'...
        ' ' 'channel_list' ' parameter for fixing'])
end
%% Set the setting for the angle sensor
ksmp_measurement_data = struct( 'offset', {},...
                                'x_coil', {},...
                                'y_coil', {},...
                                'bridge_voltage_1', {},...

```

```

                                'bridge_voltage_2', {});
ksmp_measurement_data_fresh = ksmp_measurement_data;
%% Starting Capture for angle Sensor
%=====
%       connect the scope
%=====
[interfaceObj_scope, deviceObj_scope] = connect_scope();
%=====
%       connect the function generator
%=====
[interfaceObj_funcgen, deviceObj_funcgen] = connect_funcgen();
faktor = 1; % for a test measure with magnet connected
% setup scope parameters
scope_settings = scope_settings_method_1(true);
deviceObj_scope = scope_settings;
%% Setup for the Scope

if strcmp(deviceObj_scope.Status, 'closed')
    connect(deviceObj_scope)
end
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'timebase', max_time)
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Mode', 'highres')
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Control', 'Single')
set(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint', rec_length)
set(deviceObj_scope.Waveform, 'FirstPoint', 1)
set(deviceObj_scope.Waveform, 'EndingPoint', rec_length)
if strcmp(deviceObj_scope.Status, 'closed')
    connect(deviceObj_scope)
end
%=====
%       Set scaling for scope channels
%       for angle sensors the offset should be set manually
%=====
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Scale', 500e-3)
set(deviceObj_scope.Channel(2), 'Scale', 500e-3)
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Scale', 500e-3)
set(deviceObj_scope.Channel(4), 'Scale', 500e-3)
%=====
%       Set all channels in run mode for the angle sensor
%=====
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'State', 'on')
set(deviceObj_scope.Channel(2), 'State', 'on')
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'State', 'on')
set(deviceObj_scope.Channel(4), 'State', 'on')
deviceObj_scope = scope_settings;
%% function generator -- frequency and other settings
[funcgen_settings] = funcgen_settings_method_1;
connect(funcgen_settings)

%=====
%       Setup for channel 1
%=====
set(funcgen_settings.Amplitudemodulation(1), 'Enable', 'off')
set(funcgen_settings.Frequency(1), 'Frequency', freq_chan_1);
set(funcgen_settings.Voltage(1), 'Amplitude', x_voltage_method_1/faktor);
% set(funcgen_settings.Waveform(1), 'shape', 'ramp');
%=====
%       Setup for channel 2
%=====
set(funcgen_settings.Amplitudemodulation(2), 'Enable', 'off')
set(funcgen_settings.Frequency(2), 'Frequency', freq_chan_2);
set(funcgen_settings.Voltage(2), 'Amplitude', y_voltage_method_1/faktor);

```

```

% set(funcgen_settings.Waveform(2),'shape','ramp');
% send the settings
deviceObj_funcgen = funcgen_settings;
cnt = 1;
%=====
%      turn on output of function generator
%=====
% for m = 1 : 10
%%
wb = waitbar(0,'Measurement in progress..part1');
cnt = 1;

for per = 1:new_per
    ksmp_measurement_data(cnt).x_coil =
zeros(1,get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
    ksmp_measurement_data(cnt).y_coil =
zeros(1,get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
    ksmp_measurement_data(cnt).bridge_voltage_1 =
zeros(1,get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
    ksmp_measurement_data(cnt).bridge_voltage_2 =
zeros(1,get(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint'));
    cnt = cnt+1;
end
cnt = 1;

for per = 1:new_per

% turn output of funcgen on
    set(funcgen_settings.Output(1),'State','on');
    set(funcgen_settings.Output(2),'State','on');
    set(funcgen_settings.Frequency(1),'ConcurrentState','on')
    set(funcgen_settings.Frequency(2),'ConcurrentState','on')
    waitbar(per/new_per);
    ksmp_measurement_data(cnt).offset = 'ramp';
    invoke(deviceObj_funcgen, 'trigger');           % start a burst

% wait for scope to capture data
    fprintf('Scope start singleshot number %02d... \n',per)
%    disp('Scope start singleshot ... ');
    set(deviceObj_scope.Acquisition, 'state', 'run');
    pause(11 * get(deviceObj_scope.Acquisition, 'timebase'));

% turn output of funcgen off
    set(funcgen_settings.Output(1),'State','off');
    set(funcgen_settings.Output(2),'State','off');

% get the data
    [ksmp_measurement_data(cnt).x_coil,ksmp_measurement_data(cnt).y_coil,...
ksmp_measurement_data(cnt).bridge_voltage_1,ksmp_measurement_data(cnt).brid
ge_voltage_2] = ...
    scope_capture_ksmp_field_angle_sens2(deviceObj_scope,
coil_current_channels, bridge_voltage_channels);

scope_settings_all(cnt)      = scope_settings;
funcgen_settings_all(cnt)    = funcgen_settings;
pause(WT1);
cnt = cnt+1;
end

% turn off function generator
set(funcgen_settings.Voltage(2), 'concurrent', 'off');
set(funcgen_settings.Frequency(2), 'ConcurrentState', 'off');

```

```

set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'Off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'Off');
close(wb);
% send the settings
deviceObj_funcgen = funcgen_settings;

%% Save all collected data to file
if do_save
    c = clock;
    bridges_recorded = 2;
    meas_type = 'ksmp_angle_sens_field_measurement_data';
    date_vec = datevec(date); % get date
    for k = 1:99
        filename = sprintf('%04d_%02d_%02d_%s_%02d.ksmp2.mat', date_vec(1),
date_vec(2), date_vec(3), meas_type, k);
        if( exist(filename, 'file') == 0 )
            break;
        end
    end
    end
    tic;
    save(filename, 'comment','ksmp_measurement_data',...
        'coil_factor_ch1', 'coil_factor_ch2',...
        'shunt_resistor_ch1','shunt_resistor_ch2',...
        'kepcos_feedback_resistor', ...
        'bridge_supply_voltage', 'bridges_recorded',...
        'parts', 'part', 'external_gain',...
        'x_voltage_method_1', 'y_voltage_method_1');
    disp(['Measurement data written to: ' filename])
    toc;
end
set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'off');
s_out = sprintf('\n===== \n\tPart %3.0f of
%3.0f\n===== \n',m,Mend);
disp(s_out)
% three minutes pause before next scope capture start
pause(WT2)
end

```

Skript zur Drehfeld Evaluation

```

% Eval_RechtsLinks.m
%
% Evaluation der Messung mit dem Luftspulenmessplatz und einem
% Dreieckmodulierten Sinussignal. Die Spulen werden so angesteuert, dass
% eine Drehung eines Magneten nachgebildet wird.
%
% Author: Thorben Schüthe
% E-Mail: thorben.schuethe@haw-hamburg.de
% Date : 27.02.2017
%=====
close all
clear all
clc
tic;
load('2018_11_07_v_2_ksmp_angle_all.mat');
D.coil_x = zeros(1,length(ksmp_measurement_data(1).x_coil));
D.coil_y = zeros(1,length(ksmp_measurement_data(1).x_coil));
D.sens_x = zeros(1,length(ksmp_measurement_data(1).x_coil));

```

```

D.sens_y = zeros(1,length(ksmp_measurement_data(1).x_coil));
dn = length(ksmp_measurement_data);
for n = 1 : dn
    if n == 1
        D.coil_x = [ksmp_measurement_data(1).x_coil];
        D.coil_y = [ksmp_measurement_data(1).y_coil];
        D.sens_y = [ksmp_measurement_data(1).bridge_voltage_2];
        D.sens_x = [ksmp_measurement_data(1).bridge_voltage_1];
        ksmp_measurement_data(1) = [];
    else
        D.coil_x = [D.coil_x ,ksmp_measurement_data(1).x_coil];
        D.coil_y = [D.coil_y,ksmp_measurement_data(1).y_coil];
        D.sens_y = [D.sens_y,ksmp_measurement_data(1).bridge_voltage_2];
        D.sens_x = [D.sens_x,ksmp_measurement_data(1).bridge_voltage_1];
        ksmp_measurement_data(1) = [];
    end
end
%%
imSIZE = 256;
%=====  

% Offset computation for sensor output voltage  

%=====  

D.sens_x = D.sens_x-mean(D.sens_x);
D.sens_y = D.sens_y-mean(D.sens_y);
%%
%=====  

% Compute the positions of positive and negative direction  

%=====  

rangel = 1;
range = length(D.coil_x);
d_sort = atan2(conv(D.coil_y(rangel:range),ones(1,1500)./1500,'same'),...
               conv(D.coil_x(rangel:range),ones(1,1500)./1500,'same')));
d_sort = unwrap(d_sort).*180./pi;
d_sort = conv(d_sort,[1 zeros(1,1500) -1],'same');
d_sort = conv(d_sort,[ones(1,1500)./1500],'same');

d_sort(d_sort<0) = -1; % negativ rotation (math)
d_sort(d_sort>=0) = 1; % positive rotation (math)
pos_dir = find(d_sort==1);
neg_dir = find(d_sort==-1);
%% .....
%=====  

%
%=====  

D.coil_x_pos = D.coil_x(pos_dir);
D.coil_x_neg = D.coil_x(neg_dir);
D.coil_y_pos = D.coil_y(pos_dir);
D.coil_y_neg = D.coil_y(neg_dir);

D.sens_x_pos = D.sens_x(pos_dir);
D.sens_x_neg = D.sens_x(neg_dir);
D.sens_y_pos = D.sens_y(pos_dir);
D.sens_y_neg = D.sens_y(neg_dir);
%=====  

% Sort positive and negative direction for Vx and Vy output voltage  

%=====  

FX_pos = zeros(imSIZE,imSIZE);
FY_pos = zeros(imSIZE,imSIZE);
FX_neg = zeros(imSIZE,imSIZE);
FY_neg = zeros(imSIZE,imSIZE);

for LR = 1 : 2

```

```

clear('D.h_x','D.h_y')

if LR == 1
    D.h_x = D.coil_x_pos./shunt_resistor_ch1.*coil_factor_ch1;
    D.h_y = D.coil_y_pos./shunt_resistor_ch2.*coil_factor_ch2;
elseif LR == 2
    D.h_x = D.coil_x_r./shunt_resistor_ch1.*coil_factor_ch1;
    D.h_y = D.coil_y_neg./shunt_resistor_ch2.*coil_factor_ch2;
end
D.h_x = floor(D.h_x+abs(min(D.h_x)));
D.h_x = floor((D.h_x./max(D.h_x)).*(imSIZE-1))+1;
D.h_y = floor(D.h_y+abs(min(D.h_y)));
D.h_y = floor((D.h_y./max(D.h_y)).*(imSIZE-1))+1;
for n = 1 : length(D.h_x)
    if LR == 1
        if FX_pos(D.h_y(n),D.h_x(n)) == 0
            FX_pos(D.h_y(n),D.h_x(n)) = FX_pos(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_x_pos(n);
            FY_pos(D.h_y(n),D.h_x(n)) = FY_pos(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_y_pos(n);
        else
            FX_pos(D.h_y(n),D.h_x(n)) = (FX_pos(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_x_pos(n))./2;
            FY_pos(D.h_y(n),D.h_x(n)) = (FY_pos(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_y_pos(n))./2;
        end
        elseif LR == 2
            if FX_neg(D.h_y(n),D.h_x(n)) == 0
            FX_neg(D.h_y(n),D.h_x(n)) = FX_neg(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_x_neg(n);
            FY_neg(D.h_y(n),D.h_x(n)) = FY_neg(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_y_neg(n);
            else
            FX_neg(D.h_y(n),D.h_x(n)) = (FX_neg(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_x_neg(n))./2;
            FY_neg(D.h_y(n),D.h_x(n)) = (FY_neg(D.h_y(n),D.h_x(n))+D.sens_y_neg(n))./2;
            end
        end
    end
end
end
%=====
% compute the field range for plots
%=====
min_x = min(D.coil_x_pos./shunt_resistor_ch1.*coil_factor_ch1);
max_x = max(D.coil_x_pos./shunt_resistor_ch1.*coil_factor_ch1);
min_y = min(D.coil_y_pos./shunt_resistor_ch2.*coil_factor_ch2);
max_y = max(D.coil_y_pos./shunt_resistor_ch2.*coil_factor_ch2);
Hx = [min_x:(max_x-min_x)/(imSIZE-1):max_x]./1e3;
Hy = [min_y:(max_y-min_y)/(imSIZE-1):max_y]./1e3;
%%
l_nr = 125;
%=====
% Vx => Cos output of Sensor
%=====
FX_pos_nan = FX_pos;
FX_pos_nan(FX_pos_nan==0) = nan;
FX_neg_nan = FX_neg;
FX_neg_nan(FX_neg_nan==0) = nan;
fh1 = figure(1);
set(fh1,'units','centimeters','position',[0 0 30 15])
subplot(2,2,1)
imagesc(Hx,Hy,FX_pos),axis square,hold on
caxis([-max(abs([FX_pos(:);FX_neg(:)]))
max(abs([FX_pos(:);FX_neg(:)]))])
line([Hx(1) Hx(end)], [Hy(1_nr)
Hy(1_nr)], 'color','k', 'linewidth',1.5),hold off
colormap jet,set(gca,'YDir','normal')
xlabel('H_x in kA/m')
ylabel('H_y in kA/m')

```

```

        title('positive rotation of magnet')
        colorbar
subplot(2,2,3)
    imagesc(Hx,Hy,FX_neg),axis square,hold on
    caxis([-max(abs([FX_pos(:);FX_neg(:)]))
max(abs([FX_pos(:);FX_neg(:)]))])
    line([Hx(1) Hx(end)], [Hy(1_nr)
Hy(1_nr)], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5),hold off
    colormap jet,set(gca, 'YDir', 'normal')
    xlabel('H_x in kA/m')
    ylabel('H_y in kA/m')
    title('negative rotation of magnet')
    colorbar
subplot(2,2,[2,4])
    plot(Hx,FX_neg_nan(1_nr,:).*1000, 'linewidth', 1.5),hold on
    plot(Hx,FX_pos_nan(1_nr,:).*1000, 'linewidth', 1.5),hold off
    xlim([-9 9])
    legend('negative rotation', 'positive rotation', 'location', 'south')
    grid on
    ylabel('V_{cos} in mV')
    xlabel('H_x in kA/m')
    title('COS signal')
    myColorMap = jet(256);
    myColorMap(129,:) = 1;
    colormap(myColorMap);
=====
% Vy => SIN output of Sensor
=====
FY_pos_nan          = FY_pos;
FY_pos_nan(FY_pos_nan==0) = nan;
FY_neg_nan          = FY_neg;
FY_neg_nan(FY_neg_nan==0) = nan;
fh1 = figure(2);
set(fh1, 'units', 'centimeters', 'position', [0 0 30 15])
subplot(2,2,1)
    imagesc(Hx,Hy,FY_pos),axis square,hold on
    caxis([-max(abs([FY_pos(:);FY_neg(:)]))
max(abs([FY_pos(:);FY_neg(:)]))])
    line([Hx(1_nr) Hx(1_nr)], [Hy(1)
Hy(end)], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5),hold off
    colormap jet,set(gca, 'YDir', 'normal')
    xlabel('H_x in kA/m')
    ylabel('H_y in kA/m')
    title('positive rotation of magnet')
    colorbar
subplot(2,2,3)
    imagesc(Hx,Hy,FY_neg),axis square,hold on
    caxis([-max(abs([FY_pos(:);FY_neg(:)]))
max(abs([FY_pos(:);FY_neg(:)]))])
    line([Hx(1_nr) Hx(1_nr)], [Hy(1)
Hy(end)], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5),hold off
    colormap jet,set(gca, 'YDir', 'normal')
    xlabel('H_x in kA/m')
    ylabel('H_y in kA/m')
    title('negative rotation of magnet')
    colorbar
subplot(2,2,[2,4])
    plot(Hy,FY_neg_nan(:,1_nr).*1000, 'linewidth', 1.5),hold on
    plot(Hy,FY_pos_nan(:,1_nr).*1000, 'linewidth', 1.5),hold off
    xlim([-15 15])
    legend('negative rotation', 'positive rotation', 'location', 'south')
    grid on

```



```

    ylabel('V_{cos} in mV')
    xlabel('H_x in kA/m')
    title('SIN signal')
    myColorMap = jet(256);
    myColorMap(129,:) = 1;
    colormap(myColorMap);
%=====
% Plot Differenc image from left and right rotation
%=====
fh2 = figure(3);
subplot(1,2,1)
    Diff_imX = (abs(FX_pos_nan)-abs(FX_neg_nan));
    imagesc(Hx,Hy,Diff_imX),axis square
    caxis([-max(abs(Diff_imX(:))) max(abs(Diff_imX(:)))])
    colormap jet,set(gca,'YDir','normal')
    xlabel('H_x in kA/m')
    ylabel('H_y in kA/m')
    title({'diff V_x',' (negative-positive dir)'})
    colorbar
    myColorMap = jet(256);
    myColorMap(1,:) = 1;
    colormap(myColorMap);
subplot(1,2,2)
    Diff_imY = (abs(FY_pos_nan)-abs(FY_neg_nan));
    imagesc(Hx,Hy,Diff_imY),axis square
    caxis([-max(abs(Diff_imY(:))) max(abs(Diff_imY(:)))])
    colormap jet,set(gca,'YDir','normal')
    xlabel('H_x in kA/m')
    ylabel('H_y in kA/m')
    title({'diff V_y',' (negative-positive dir)'})
    colorbar
    myColorMap = jet(256);
    myColorMap(1,:) = 1;
    colormap(myColorMap);
%=====
% Plot Differenc image from left and right rotation
%=====
fh2 = figure(4);
subplot(1,2,1)
    Diff_imX = (abs(FX_pos_nan)-abs(FX_neg_nan));
    imagesc(Hx,Hy,FX_pos),axis square
%    caxis([-max(abs(Diff_imX(:))) max(abs(Diff_imX(:)))])
    colormap jet,set(gca,'YDir','normal')
    xlabel('H_x in kA/m')
    ylabel('H_y in kA/m')
    title({'diff V_x',' (negative-positive dir)'})
    colorbar
    myColorMap = jet(256);
    myColorMap(1,:) = 1;
    colormap(myColorMap);
subplot(1,2,2)
    imagesc(Hx,Hy,FX_pos_nan),axis square
save('2018_10_29_inv_AIR_KSMP_CIRC_FIELD',...
    'FX_pos','FY_pos',...
    'FX_neg','FY_neg',...
    'Hx','Hy',...
    'imSIZE',...
    'FX_pos_nan','FY_pos_nan',...
    'FX_neg_nan','FY_neg_nan',...
    'Diff_imX','Diff_imY','max_x','max_y','min_x','min_y')

toc;

```

Skript zur exemplarischen Darstellung der Spannungsamplitude und des Kennfeldgitters

```

% close all
clear all
clc
f1      = 0.11;
f2      = 0.3;

tend = 50;
t = 0:tend/(1e5-1):tend;

sig1 = sawtooth(2*pi*t*f1, 0.5);
sig2 = sawtooth(2*pi*t*f2, 0.5);

subplot(1,2,1)
    plot(t,sig1,t,sig2,'linewidth',1.5)
    set(gca,'FontSize',18);
    ylabel('Ausgangsspannung [V]','FontSize',22)
    xlabel('Zeit [s]','FontSize',22)
    title('Exemplarische Darstellung der Ausgangsspannungen' ,
        'FontWeight' , 'normal','FontSize',22)
    grid on
subplot(1,2,2)
    plot(sig1,sig2,'linewidth',1.5)
    set(gca,'FontSize',18);
    ylabel('H_Y [kA/m]','FontSize',22)
    xlabel('H_X [kA/M]','FontSize',22)
    title('Exemplarische Darstellung der Gitterstruktur' , 'FontWeight'
        , 'normal','FontSize',22)
    grid on
    line([0 0],ylim,'color','k','linewidth',1.5); %x-axis
    line(xlim, [0 0],'color','k','linewidth',1.5); %y-axis
    davinci('arrow','X',[0 0], 'Y',[0 0])
%     xlim([-1.2 1.2])
%     ylim([-1.2 1.2])
    axis square
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Skript zur Einstellung des Funktionsgenerators für den Einsatz in dem Eisen-KSMP

```

% Funktionsgenerator_ArbExpress_WafeFormEinstellen.m
%
% Mit diesem Skript koennen Wellenformen an den Funktionsgenerator
% gesendet werden. Dies ist beispielsweise bei der Kennfelderfassung
% notwendig, wenn eine Modulation eingesetzt werden soll, bei der das Hx
% und Hy Feld eine 90° phasenverschiebung aufweisen sollen.
%
% Author: Thorben Schueth
% E-Mail: thorben.schueth@haw-hamburg.de
% Date : 11.05.2018
%=====
clear all
clc
addpath('functions\')
sendDat = 0;

clear('N')
nfac = 1;
% npower = 1;
dp = 48e3;

```

```

nr = 320;
phase_delay = 0;

t = 0:1/dp:1-1/dp;
tdeg = 1;
time_delay = .25;

T = (t(1:end/2));

f1      = 20;%640;
phi1    = 0;

f2      = 15;%635;
phi2    = 0;

nnn = 2;
npower = 1;
=====
waveform0 = [sawtooth(2*pi*f1*t+phi1.*pi./180,.5)];

waveform0 = [(t(1:end/nnn)+time_delay).^npower .*waveform0 (1:end/nnn) ,...
              -(t(1:end/nnn) 1/nnn)+time_delay).^npower. *waveform0 (1:end/nnn)];
=====
waveform1 = [sawtooth(2*pi*f2*t+phi2.*pi./180,.5)];

waveform1 = [(t(1:end/nnn)+time_delay).^npower .*waveform1(1:end/nnn),...
              -(t(1:end/nnn)1/nnn)+time_delay).^npower.*waveform1(1:end/nnn)];

waveform0 = waveform0./max(abs(waveform0)).*nfac;
waveform1 = waveform1./max(abs(waveform1)).*nfac;

subplot(2,1,1)
    plot(waveform0,waveform1); axis square
    xlim([-1 1])
    ylim([-1 1])

subplot(2,1,2)
    waveform0 = uint16((waveform0 - min(waveform0))./(max(waveform0) -
min(waveform0))*(2^14-1.5));
    waveform1 = uint16((waveform1 - min(waveform1))./(max(waveform1) -
min(waveform1))*(2^14-1.5));

    plot(t,waveform0,t,waveform1);

xlim([0 1]);
xlabel('Zeit [s]','FontSize',22);
ylabel('normierte Spannung','FontSize',22);
ylim([-1 1])
    title('Custom waveform created in MATLAB','FontSize',32);grid on;
    set(gca, 'FontSize',18);

if sendDat
    [interfaceObj_funcgen, deviceObj_funcgen] = connect_funcgen();
    fclose(interfaceObj_funcgen);
    interfaceObj_funcgen.OutputBufferSize = 100e3;
    fopen(interfaceObj_funcgen);
    [funcgen_settings] = funcgen_settings_method_1;
    connect(funcgen_settings)

```

```

=====

```

```

    waveform0 = uint16((waveform0 - min(waveform0))./(max(waveform0) -
min(waveform0))*(2^14-1.5));
    waveformLength = length(waveform0);

    binblock          = zeros(1,2*waveformLength, 'uint8');
    binblock(2:2:end) = bitand(waveform0, 255);
    binblock(1:2:end) = bitshift(waveform0, -8);

% Build binary block header
bytes = num2str(length(binblock));
header = ['#' num2str(length(bytes)) bytes];
fprintf(interfaceObj_funcgen, ['DATA:POINTS EMemory, '
num2str(length(t))]);pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, ['DATA:DATA EMemory,' header binblock],
'uint8');pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, 'DATA:COPY USER1,EMemory', 'uint8');pause(1);

%=====
    waveform1      = uint16((waveform1 -
min(waveform1))./(max(waveform1)-min(waveform1))*(2^14-1.5));
    waveformLength = length(waveform1);
    binblock       = zeros(1,2*waveformLength, 'uint8');
    binblock(2:2:end) = bitand(waveform1, 255);
    binblock(1:2:end) = bitshift(waveform1, -8);

% Build binary block header
    bytes = num2str(length(binblock));
header = ['#' num2str(length(bytes)) bytes];
    fprintf(interfaceObj_funcgen, ['DATA:POINTS EMemory, '
num2str(length(t))]);pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, ['DATA:DATA EMemory,' header binblock],
'uint8');pause(1);
fwrite(interfaceObj_funcgen, 'DATA:COPY USER2,EMemory',
'uint8');pause(1);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Skript zur Einstellung des Funktionsgenerators für den Einsatz in dem Luft-KSMP

```

% Author: Thorben Schueth
% E-Mail: thorben.schueth@haw-hamburg.de
% Date : 2018.11.05
close all
clear all
clc
sendDat = 0;
%%
clear('N')
dp = 48e3;
% [320 300 250 240 200 192 160]
nr = 10;
phase_delay = 0;
t = 0:1/dp:1-1/dp;
tdeg = 0;
time_delay = 0.01;
T = (t(1:end/2));
nnn = 2;
npower = 1;
%=====
% Forward Backward -> Modulation SIN
%=====
waveform0 = [sin(nr*2*pi*t(1:end/nr)+phase_delay.*pi./180), ...

```

```

        -sin(nr*2*pi*t(1:end/nr)-phase_delay.*pi./180)];
waveform0 = repmat(waveform0,1,nr/2);

waveform0 = [(t(1:end/nnn)+time_delay).*waveform0(1:end/nnn),...
            -(t(1:end/nnn)-1/nnn)+time_delay).*waveform0(1:end/nnn)];
%=====
% Forward Backward -> Modulation COS
%=====
waveform1 = [cos(nr*2*pi*t(1:end/nr)+phase_delay.*pi./180),...
            cos(nr*2*pi*t(1:end/nr)-phase_delay.*pi./180)];
waveform1 = repmat(waveform1,1,nr/2);

waveform1 = [(t(1:end/nnn)+time_delay).*waveform1(1:end/nnn),...
            -(t(1:end/nnn)-1/nnn)+time_delay).*waveform1(1:end/nnn)];
%=====
%=====
waveform0 = waveform0./max(abs(waveform0));
waveform1 = waveform1./max(abs(waveform1));
fh1 = figure(1);
set(fh1,'Units','centimeters','Position',[0 0 14 6])
subplot(1,2,2)
    plot(waveform1,waveform0,'linewidth',1.5); axis square xy;grid on;
    title('e_2(e_1)','FontWeight','normal')
    xlim([-1 1])
    ylim([-1 1])
    ax1 = get(gca);
    xlabel('e_1 [mV/V]')
    ylabel('e_2 [mV/V]')
subplot(1,2,1)
    plot(t,waveform1,t,waveform0,'linewidth',1.5);grid on;
    xlim([0 1]);xlabel('Sample Index');
    ylim([-1 1])
    title('e_1(t) - blau - und e_2(t) - rot -','FontWeight','normal');
    xlabel('t [s]')
    ylabel('e_{1,2} [mV/V]')
%    ax2 = get(gca);

%% Send Data to arbitrary function generator
if sendDat
    [interfaceObj_funcgen, deviceObj_funcgen] = connect_funcgen();
    fclose(interfaceObj_funcgen);
    interfaceObj_funcgen.OutputBufferSize = 100e3;
    fopen(interfaceObj_funcgen);
    [funcgen_settings] = funcgen_settings_method_1;
    connect(funcgen_settings)
%=====
    waveform0      = uint16((waveform0 - min(waveform0))./(max(waveform0)-
min(waveform0))*(2^14-1.5));
    waveformLength = length(waveform0);

    binblock      = zeros(1,2*waveformLength, 'uint8');
    binblock(2:2:end) = bitand(waveform0, 255);
    binblock(1:2:end) = bitshift(waveform0, -8);
    % Build binary block header
    bytes = num2str(length(binblock));
    header = ['#' num2str(length(bytes)) bytes];
    fprintf(interfaceObj_funcgen, ['DATA:POINTs EMEMoRY, '
num2str(length(t))]);pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, ['DATA:DATA EMEMoRY,' header binblock],
'uint8');pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, 'DATA:COPY USER2,EMEMoRY', 'uint8');pause(1);

```

```

=====
    waveform1          = uint16((waveform1 -
min(waveform1))./(max(waveform1)-min(waveform1))*(2^14-1.5));
    waveformLength     = length(waveform1);
    binblock           = zeros(1,2*waveformLength, 'uint8');
    binblock(2:2:end)  = bitand(waveform1, 255);
    binblock(1:2:end)  = bitshift(waveform1, -8);

% Build binary block header
    bytes = num2str(length(binblock));
    header = ['#' num2str(length(bytes)) bytes];
    fprintf(interfaceObj_funcgen, ['DATA:POINTs EMEMoRY, '
num2str(length(t))]);pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, ['DATA:DATA EMEMoRY,' header binblock],
'uint8');pause(1);
    fwrite(interfaceObj_funcgen, 'DATA:COPY USER1,EMEMORY',
'uint8');pause(1);
end
=====
=====

```

Skript zum Dateien Zusammenfassen

```

close all
clear all
clc
pause(1)

nt = 1;
for n = 1 : 20
    d =
sprintf('2018_08_02_ksmp_angle_sens_field_measurement_data_%02.0f.ksmp2.mat
',n);
    DAT = load(d);
    if n == 1
        bridge_supply_voltage = DAT.bridge_supply_voltage;
        bridges_recorded = DAT.bridges_recorded;
        coil_factor = DAT.coil_factor;
        comment = DAT.comment;
        external_gain = DAT.external_gain;
        kepco_feedback_resistor = DAT.kepco_feedback_resistor;
        part = DAT.part;
        parts = DAT.parts;
        shunt_resistor = DAT.shunt_resistor;
        x_voltage_method_1 = DAT.x_voltage_method_1;
        y_voltage_method_1 = DAT.y_voltage_method_1;
    end
    for m = 1 : length(DAT.ksmp_measurement_data)
        ksmp_measurement_data(nt) = DAT.ksmp_measurement_data(m);
        nt = nt+1;
    end
    clear('DAT')
    pause(1)
end
%%

save('2018_08_02_NVE_RAMP_ALL','ksmp_measurement_data'...
,'bridge_supply_voltage','bridges_recorded','coil_factor','comment'...
,'external_gain','kepco_feedback_resistor','part','parts'...
,'shunt_resistor','x_voltage_method_1','y_voltage_method_1')

clc

```

```

st = sprintf(['\t=====\\n',...
            '\t|           Speicherung fertig           |\n',...
            '\t=====\\n']);

disp(st)
pause(1)
clc

```

Funktion zur Verbindung des Funktionsgenerators und Oszilloskop

```

%=====
                                Funktionsgenerators
%=====
function [y1,y]= connect_funcgen()
% Create a VISA-USB object.
interfaceObj = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
'USB0::0x0699::0x0347::C033296::0::INSTR', 'Tag', '');
% Create the VISA-USB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.

if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = visa('TEK', 'USB0::0x0699::0x0347::C033296::0::INSTR');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end

% Create a device object.
y = icdevice('tek_afg3000.mdd', interfaceObj);
y1 = interfaceObj;
connect(y)
end

%=====
                                Oszilloskop
%=====
function [y,y1] = connect_scope()
interfaceObj = instrfind('Type', 'visa-usb', 'RsrcName',
'USB0::0x0699::0x0423::C010087::0::INSTR', 'Tag', '');
% Create the VISA-USB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.

if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = visa('tek', 'USB0::0x0699::0x0423::C010087::0::INSTR');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end

% Create a device object.
y1 = icdevice('dpo4054.mdd_s', interfaceObj);
y = interfaceObj;
connect(y1)

end

```

Skript zur Einstellung des Funktionsgenerators zur Vermessung des Spulenfaktors

```

%Stufenförmige Sinussignalsverlauf
close all
clear all
clc

sendDat = 1;
%%
clear('waveform0','waveform1','wfm')
dp      = 48e3;
f1      = 2;
nr      = 10;

phase_delay = 45;

t = 0:1/dp:1-1/dp;

time_delay = 1;

% waveform0 = t;
% waveform1 = t;

t_end1    = length(t);
t_step1   = t_end1/nr;

tau = 25;

for n = 1 : 1

    waveform0(1+t_step1*(n-1):t_step1*n*tau/100) = (1+t_step1*(n-1):t_step1*n*tau/100)./(t_step1*n*tau/100);

    waveform0(1+t_step1*n*tau/100:t_step1*n) = 1;
end

for n = 1: nr/2
    waveform1(:,n)=[waveform0+n-1]./nr;
end

wfm = waveform1(:);
wfm = [wfm;-wfm+0.5]./0.25-1;
xlim([0 1]);xlabel('Zeit [m^-3'],'FontSize',22);

plot(t,wfm,'linewidth',2.5)
xlim([0 1]);xlabel('Zeit [ms'],'FontSize',22);
ylim([-1.1 1.1]); ylabel('Auslenkung','FontSize',22);
    title('Aanregungsfunktion zur Spulenfaktormessung','FontSize',32);grid
on;
set(gca,'FontSize',18);
%%
dd = 1;
nf = 1-dd./100;
wfm_out1 = wfm./max(abs(wfm)).*nf;
plot(wfm_out1)
%%
if sendDat
    [interfaceObj_funcgen, deviceObj_funcgen] = connect_funcgen();

```



```

fclose(interfaceObj_funcgen);
interfaceObj_funcgen.OutputBufferSize = 100e3;
fopen(interfaceObj_funcgen);
[funcgen_settings] = funcgen_settings_method_1;
connect(funcgen_settings)

set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'off');

=====
%=====
WFM_SEND      = uint16((wfm_out1 - min(wfm_out1))./...
                    (max(wfm_out1)-min(wfm_out1))*(2^14-1.5));
waveformLength = length(wfm_out1);

binblock      = zeros(1,2*waveformLength, 'uint8');
binblock(2:2:end) = bitand(WFM_SEND, 255);
binblock(1:2:end) = bitshift(WFM_SEND, -8);
% Build binary block header
bytes = num2str(length(binblock));
header = ['#' num2str(length(bytes)) bytes];
fprintf(interfaceObj_funcgen, ['DATA:POINTS EMEemory, '
num2str(length(t))]);pause(1);
fwrite(interfaceObj_funcgen, ['DATA:DATA EMEemory,' header binblock],
'uint8');pause(1);
fwrite(interfaceObj_funcgen, 'DATA:COPY USER1,EMEMory',
'uint8');pause(1);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Skript zur Vermessung des Spulenfaktors mit der Verwendung des Gauß-Meters

```

close all
clear all
clc

%%
Slist = seriallist;
NR = length(Slist);

for n = 1 : NR
    s = serial(Slist(n), 'BaudRate', 19200, 'DataBits', 8);
    s.Terminator = 'CR';
    s.Timeout = 1;
    try
        fopen(s)
        fprintf(s, '?MEAS')
        idn = fscanf(s);

        meas = strrep(idn, '\r\n', '');
        meas = strsplit(meas, ' ');
        F = meas{1,2};
        if strcmp(F, 'kA/m', 4)
            flag(n) = 1;
            COM_PORT = Slist(n);
        else
            flag(n) = 0;
        end
    catch
    end
end

```

```

        flag(n) = 0;
    end
    fclose(s)
end
fclose(s)
s = serial('COM3', 'BaudRate', 19200, 'DataBits', 8);
s.Terminator = 'CR';
s.Timeout = 0.01;
fopen(s)

NR = 1e3;

Fstrngth = zeros(1, NR);
for n = 1 : NR

    try
        % get the field strength in kA/m
        fprintf(s, '?MEAS')
        meas = fscanf(s);
        meas = strrep(meas, '\r\n', '');
        meas = strsplit(meas, ' ');
        Fstrngth(n) = str2double(meas{1,1});
    catch
        Fstrngth(n) = NaN;
    end
    plot(Fstrngth)
    drawnow
end
fclose(s)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Skript für die Einstellungen der Phasen der Kanäle des Funktionsgenerators

```

close all
clear all
clc
addpath('functions\')

[interfaceObj_funcgen, deviceObj_funcgen] = connect_funcgen();
fclose(interfaceObj_funcgen);
interfaceObj_funcgen.OutputBufferSize = 100e3;
fopen(interfaceObj_funcgen);
[funcgen_settings] = funcgen_settings_method_1;
connect(funcgen_settings)

set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'off');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'off');

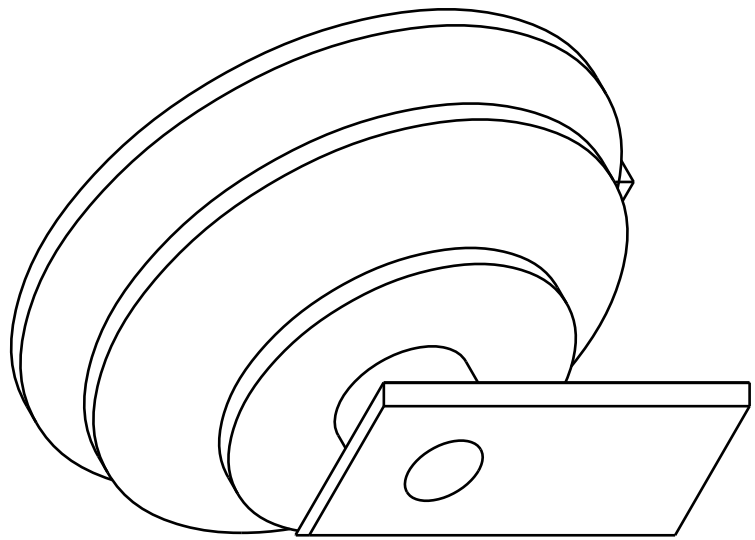
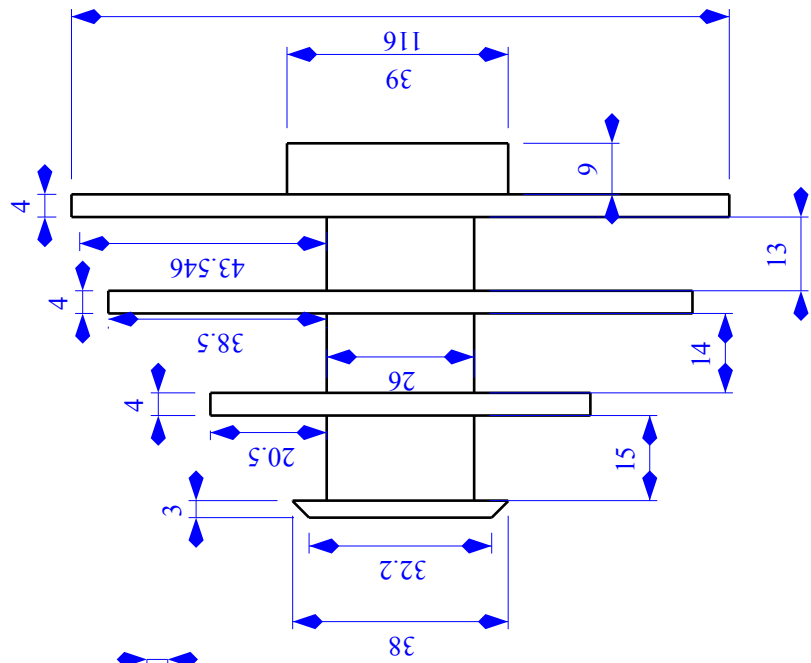
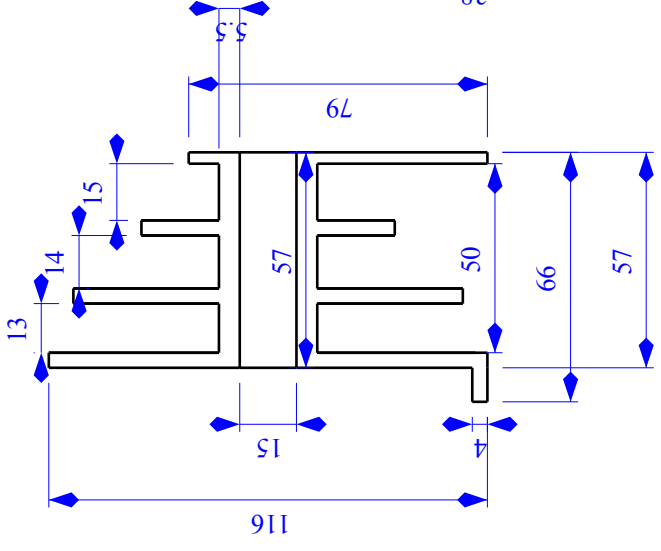
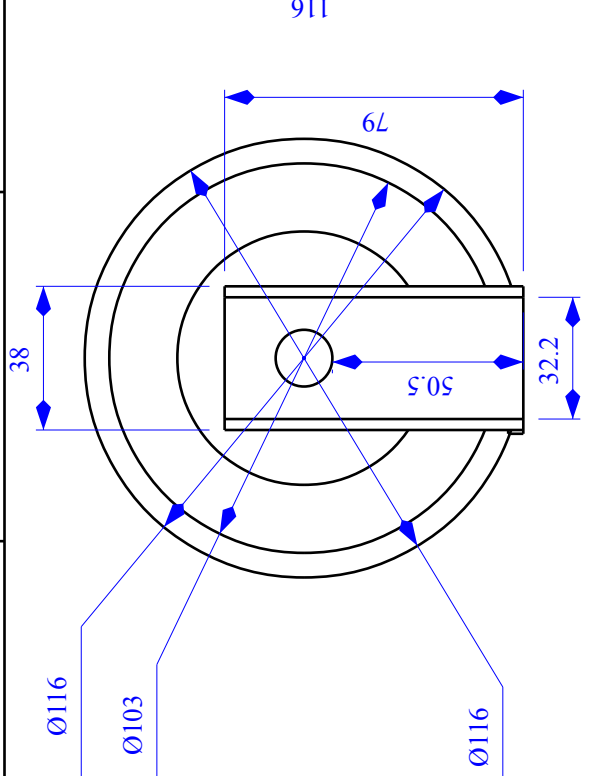
set(funcgen_settings.Frequency(1), 'ConcurrentState', 'on') % same as align
phase
set(funcgen_settings.Waveform(1), 'shape', 'User1')           % Select
waveform shape
set(funcgen_settings.Waveform(2), 'shape', 'User2')           % Select
waveform shape

set(funcgen_settings.Output(1), 'State', 'on');
set(funcgen_settings.Output(2), 'State', 'on');

```

Anhang D: Technische Zeichnungen

4 3 2 1



Kegelluftspule

DESIGNED BY:
Ahmed Albounyan

DATE:
08.08.2018

SIZE
A4

WEIGHT (KG)
Weight 1

DRAWING NUMBER
1

SHEET
1/1

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.

G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

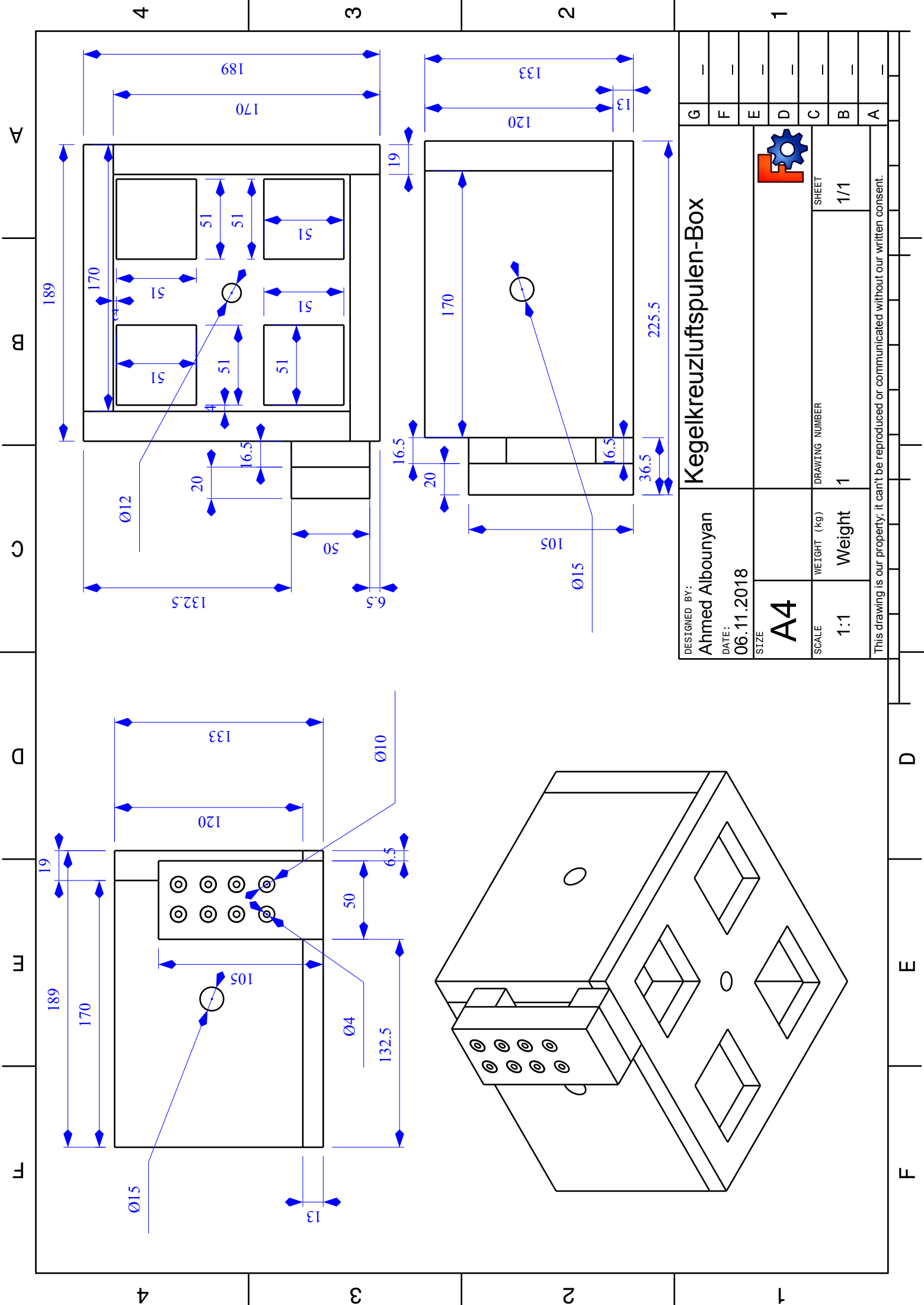



4 3 2 1

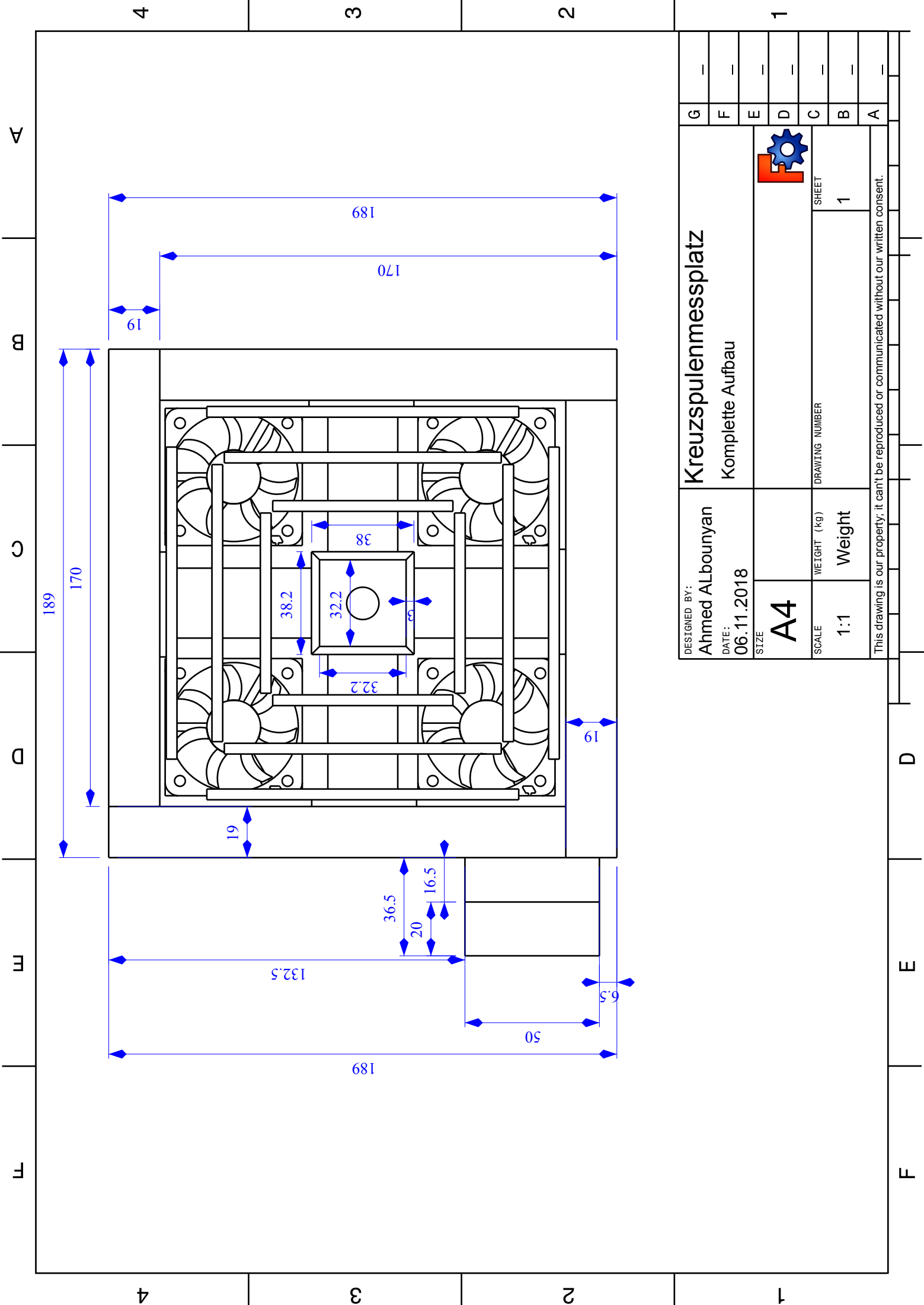
F

E

D




DESIGNED BY: Ahmed Albounyan DATE: 06.11.2018 SIZE: A4 SCALE: 1:1	G	Kegelkreuzluftspulen-Box 	
	F		
	E		
	D		
	C		
	B		
A	SHEET 1/1		
WEIGHT (KG) Weight 1		DRAWING NUMBER 1	
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.			



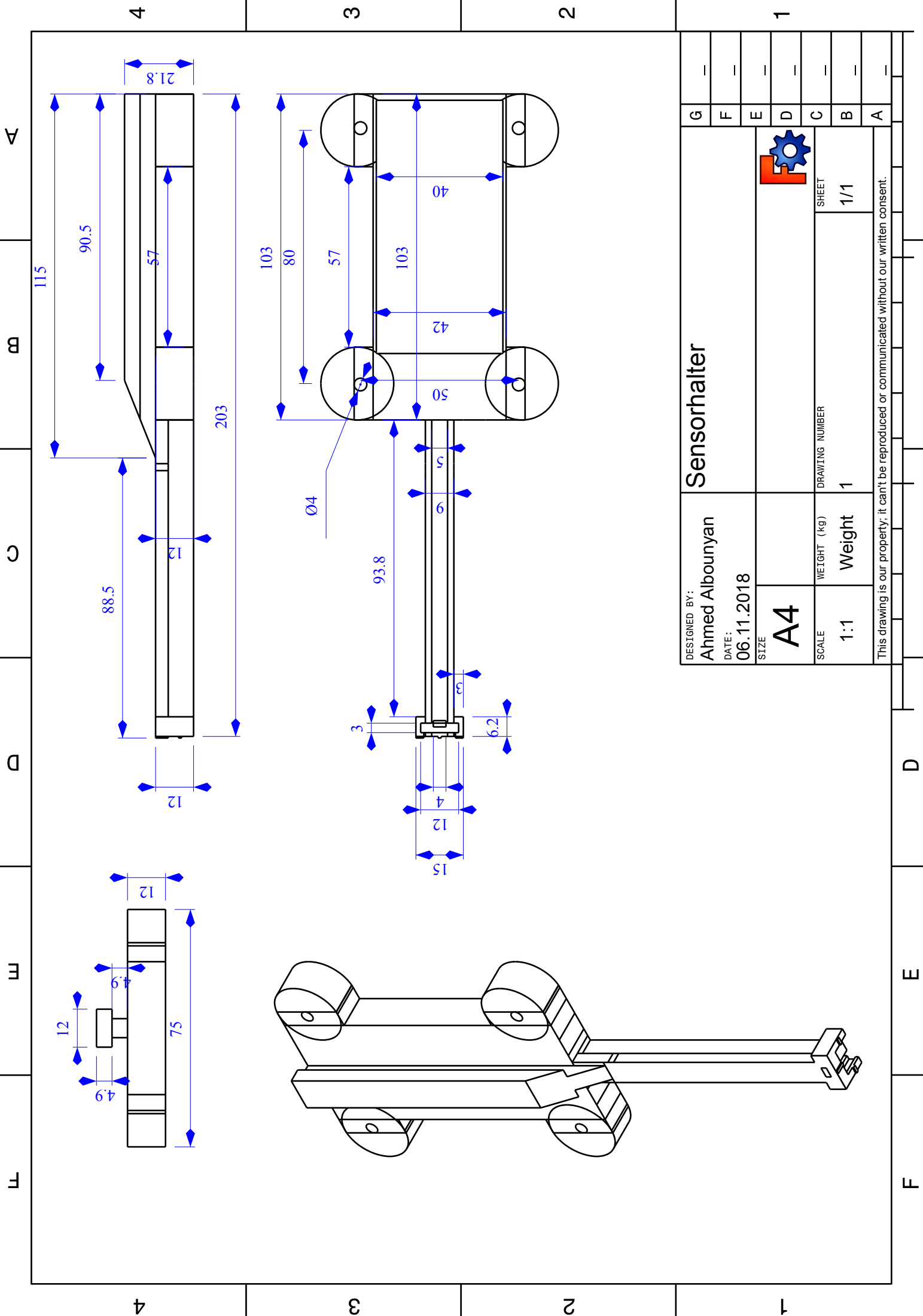
A
B
C
D
E
F


4
3
2
1

DESIGNED BY:	Ahmed ALbounyan	
DATE:	06.11.2018	
SIZE	A4	
SCALE	1:1	
WEIGHT (kg)	Weight	
DRAWING NUMBER	1	
SHEET	1	
		
Kreuzspulenmessplatz Komplette Aufbau		
G	-	
F	-	
E	-	
D	-	
C	-	
B	-	
A	-	

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.

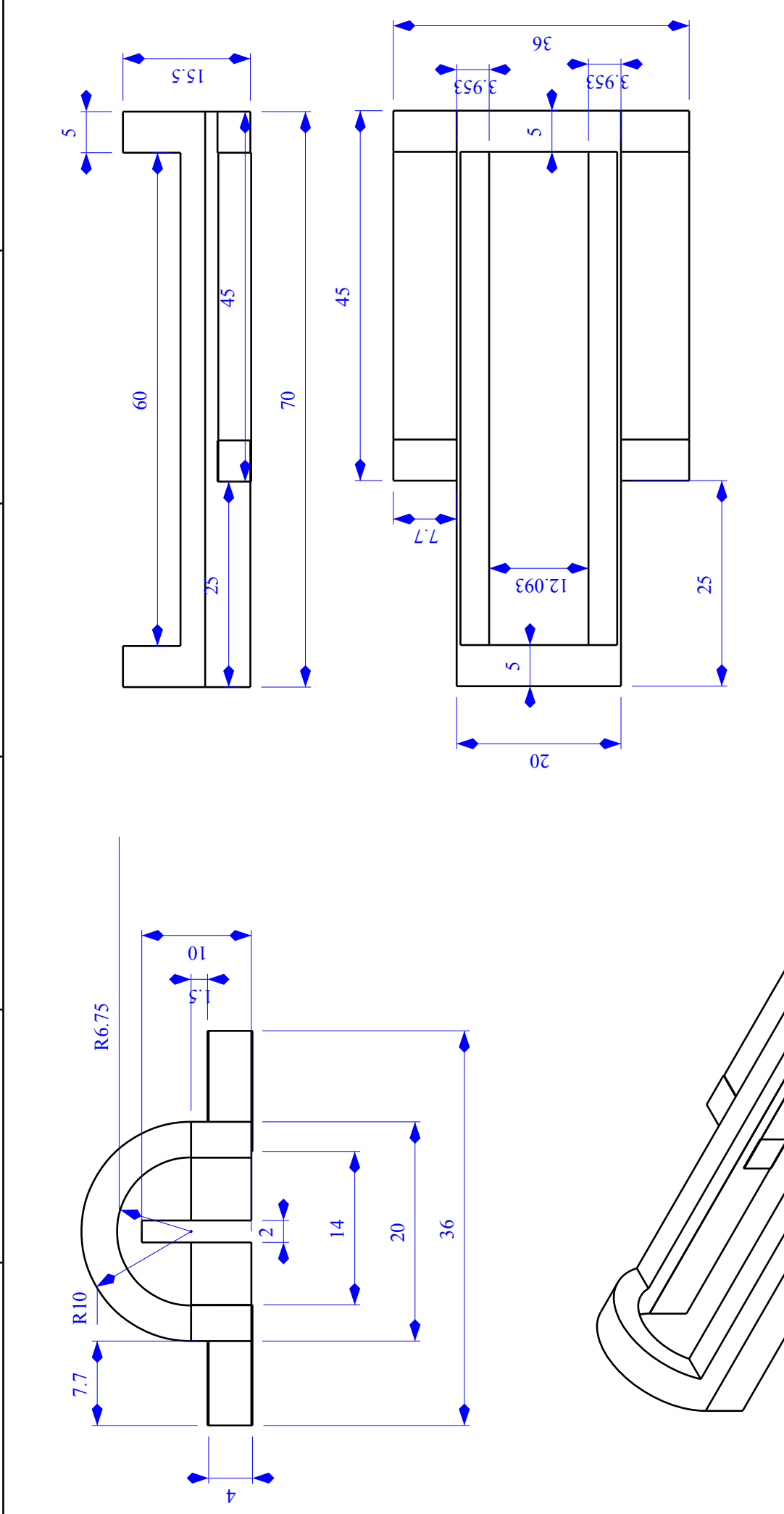
D
E
F




DESIGNED BY:	Ahmed Albounyan	
DATE:	06.11.2018	
SIZE	A4	
SCALE	1:1	
WEIGHT (kg)	Weight	1
DRAWING NUMBER	1/1	
		
SHEET 1/1		
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.		

Sensorhalter	
G	—
F	—
E	—
D	—
C	—
B	—
A	—

A B C D E F



DESIGNED BY:	Ahmed Albounyan	
DATE:	06.11.2018	
SIZE	A4	
SCALE	1:1	
WEIGHT (KG)	Weight	1
DRAWING NUMBER	1/1	
SHEET	1/1	
		
Gaussonde-Halter		
G	-	
F	-	
E	-	
D	-	
C	-	
B	-	
A	-	

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written consent.

F

4 3 2 1

F E D

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Ahmed Albouynan, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht. Hamburg, 20. Dezember 2018.

Hamburg den 24. Dezember 2018

Ort und Datum



Ahmed Albouynan