

Bachelorarbeit

Tobias Wulf

Winkelmessung durch magnetische Sensor-Arrays und
Toleranzkompensation mittels Gauß-Prozess

Tobias Wulf

Winkelmessung durch magnetische Sensor-Arrays und Toleranzkompensation mittels Gauß-Prozess

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

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

Eingereicht am: TT. Monat Jahr

Tobias Wulf

Thema der Arbeit

Winkelmessung durch magnetische Sensor-Arrays und Toleranzkompensation mittels Gauß-Prozess

Stichworte

Sensor-Array Simulation, Dipol, Magnetfeld, Kugelmagnetapproximation, TMR, TDK TAS2141, AMR, NXP KMZ60, Toleranzkompensation, Gauß-Prozess, Kovarianzmatrix, Regression, Winkelvorhersage

Kurzzusammenfassung

...

Tobias Wulf

Title of Thesis

Angular Measurement by Magnetic Sensor Arrays and Tolerance Compensation by Gaussian Process

Keywords

Sensor Array Simulation, Dipole, Magnetic Field, Spherical Magnet Approximation, TMR, TDK TAS2141, AMR, NXP KMZ60, Tolerance Compensation, Gaussian Process, Covariance Matrix, Regression, Angular Prediction

Abstract

...

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation 0.0.1 17.02.2021	1
1.1 Stand der Vorarbeiten	2
1.2 Zielstellung	7
2 Grundlagen 0.0.2 19.02.2021	8
2.1 Kreisdarstellung des klassischen Anwendungsfalls	8
2.2 Euklidischer Abstand in Normschreibweise	11
2.3 Magnetische Sensoren und Drehwinkelerfassung	13
2.4 Kennfeldmethode zur Charakterisierung von Sensoren	17
2.5 Prinzip des Sensor-Arrays	26
2.6 Sensor-Array-Simulation über Dipol-Feldgleichung	26
2.7 Gauß-Prozesse für Regressionsverfahren	26
3 Software-Entwicklung für Optimierungsexperimente 0.0.2 19.02.2021	27
3.1 Aufgabe und Funktionen der Software	27
3.2 Aufbau und Vorgehen	27
3.3 Sensor-Array-Simulation	28
3.4 Gauß-Prozess-Regression	28
4 Erprobungs- und Optimierungsexperimente 0.0.1 13.01.2021	29
4.1 Festlegung des Startpunktes	29
4.2 Festlegung des Verfahrweges ohne Verkippung	30
4.3 Simulationsdurchführung	30
5 Auswertung 0.0.1 13.01.2021	31
5.1 Gegenüberstellung der GPR-Modelle	31
6 Zusammenfassung und Bewertung 0.0.1 13.01.2021	32
Abbildungsverzeichnis	33

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	34
Glossar	35
Abkürzungen	36
Literatur	37
Anhang	38
A Genutzte Software 0.0.3 08.01.2021	39
B Software-Dokumentation 0.0.4 13.01.2021	40
Selbstständigkeitserklärung	41

1 Motivation 0.0.1 17.02.2021

Magnetische Sensoren erlauben die berührungslose Erfassung von Drehzahlen und Winkelinformationen. In modernen Automobilen werden sie unter anderem in der Motorelektronik und im Bremsystem eingesetzt. Neuentwicklungen in der Halbleitertechnik, auf Basis des TMR-Effekts, ermöglichen den Aufbau komplexerer Sensorstrukturen [10]. Die Arbeitsgruppe Sensorik an der HAW Hamburg erforscht moderne Ansätze der Signalverarbeitung für neu gewonnene Sensorstrukturen, verwirklicht als magnetische Sensor-Arrays. Durch den Aufbau von Sensoren als Arrays, bieten sich Möglichkeiten zur Nutzung von Algorithmen und Regressionsverfahren an, die eine Kompensation und Detektion von mechanischen Toleranzen zulassen [14].

Das Verarbeiten einer Vielzahl an Messwerten, bedingt durch Sensor-Array-Strukturen, ist hierbei eine der Herausforderungen die es zu bewältigen gilt. Mit Hilfe moderner Algorithmen, die Ansätze des maschinellen Lernens beinhalten, ergeben sich weitere Problemstellungen in Bezug auf Modellabbildung- und Optimierung. Das übergeordnete Ziel bei der Lösung und Bewältigung der einzelnen Etappen ist die Verbesserung der Messgenauigkeit, indem individuelle Abweichungen des Sensors einem geeigneten Modell antrainiert und Modellparameter optimiert werden.

Moderne Regressionsverfahren liefern dabei statistische Ansätze um geeignete Qualitätskriterien zu bilden und somit trainierte Modelle und ihre Messwertgenauigkeit bewerten zu können, sodass eine Erprobung und Bewertung der erstellten Modelle, mit Toleranz-Abweichungen in den Eingangsdaten, während einer Arbeitsphase untersucht werden können. Diese Arbeit konzentriert dabei auf die simulative Abbildung eines Tunnel-Magnetoresistance (TMR)-Sensormodells für die Drehwinkelerfassung.

1.1 Stand der Vorarbeiten

Einleitend findet, zur Erörterung der Ziele und Inhalte dieser Arbeit, eine kurze Zusammenfassung der Vorarbeiten statt. Für den Inhalt relevante Aspekte der Vorarbeiten werden im Kapitel 2 näher beleuchtet und erklärt.

Aktuell steht kein magnetisches TMR-Sensor-Array als eigenständiges Integrated-Circuit (IC) zur Verfügung. Im Zuge des Forschungsprojekts Signalverarbeitung für Integrated-Sensor-Array (ISAR) sind in der Arbeitsgruppe Sensorik Machbarkeitsstudien [9][12] erbracht worden, die generelle Funktionalitäten und die technische Umsetzung eines magnetischen Sensor-Arrays im Maßstab 1 : 25 zeigen.

Platinen-Sensor-Array

So ist als erster Ansatz, das in Abbildung 1.1 zu sehende Platinen-Sensor-Array entwickelt worden. Für den Aufbau des Platinen-Sensor-Arrays sind einzelne Winkelsensoren in Sensorsbänken angeordnet. Die Messwerterfassung erfolgt über ein Hyperplexing-Verfahren. Eine Steuerung des Hyperplexings und die weitere Messwertverarbeitung erfolgt mit Hilfe eines Mikrocontrollers.

Diese Herangehensweise lässt eine Untersuchung der technischen Machbarkeit auf der Basis von heute zur Verfügung stehenden Technologien und Winkelsensoren zu. So ist das Platinen-Sensor-Array in verschiedenen Versionen, mit Anisotrope-Magnetoresistance (AMR)-Sensoren der Firma NXP Semiconductors (KMZ60) [3] und TMR-Sensoren der Firma TDK (TAS2141-AAAB) [6] verwirklicht worden. Das Maßstabsmodell des magnetischen Sensor-Arrays kann zu Vergleichs- und weiteren Erprobungsarbeiten genutzt werden, die z.B. Erkenntnisse aus Simulationen und Hardware-Optimierungsarbeiten einbinden.

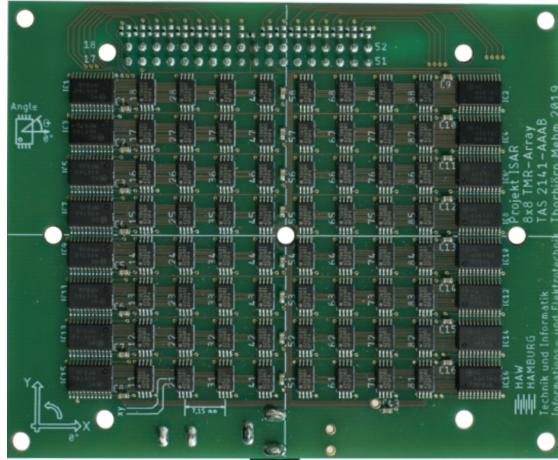


Abbildung 1.1: Platinen-Sensor-Array im Maßstab 1:25 aufgebaut als 8×8 Sensor-Array, dass als Aufsteckmodul für eine Mikrocontroller getriebene Signalverarbeitung bereitsteht [9]. Die einzelnen Sensoren sind in Sensorbänken angeordnet. Die Anordnung erfolgt in eine linke und rechte Sensorbank pro Reihe auf der Platine. Eine Sensorbank besteht jeweils aus einem Multiplexer-IC und vier daneben liegenden Sensor-ICs. Abbildung entnommen aus [9].

Simulationsmodell des Sensor-Arrays

Einen weiteren Ansatz, der durch die Arbeitsgruppe Sensorik verfolgt wird, ist die Entwicklung eines Simulationsmodells auf Grundlage von Charakterisierungsdatensätzen. Hierfür wird ein einzelnes Sensor-IC, z.B. der TMR-Sensor TAS2141-AAAB der Firma TDK, nach einer bestimmten Kennfeldmethode [10] charakterisiert. Der so gewonnene Datensatz kann dann, durch geeignete Interpolationsverfahren, in einer Simulation zur Generierung eines magnetischen Sensor-Arrays genutzt werden. In Abbildung 1.2 ist das Kernprinzip des Simulationsansatzes vereinfacht dargestellt. Es wird ein Simulationsmodell aufgebaut, dass Charakterisierungsdatensätze verarbeiten kann und entsprechende Charakteristiken eines einzelnen Sensor-ICs zu einem Sensor-Array interpoliert. Abhängig von weiteren gewählten Eigenschaften des Sensor-Arrays, wie geometrische Anordnung und Größe, produziert das interpolierte Modell Simulationsdatensätze, die das Verhalten des einzelner Sensor-ICs ortsabhängig im Sensor-Array abbilden.

Der Simulationsansatz besitzt ebenfalls den Vorteil Modelle aufzubauen, die sich auf heute zur Verfügung stehenden Technologien beziehen. Weitere Vorteile sind die Manipulationsfähigkeit der Sensor-Array-Geometrie und -Größe. So bieten sich Möglichkei-

ten magnetische Sensor-Arrays in verschiedenen Maßstäben und geometrischen Formen zu simulieren. Des weiteren können verschiedene Anwendungsszenarien simuliert werden. Eine Problemstellung die sich dabei ergibt, ist die physikalisch sinnvolle Stimulanz des Simulationsmodell. Für das Platinen-Sensor-Array ist im trivialen Anwendungsfall die Stimulanz ein simpler Permanentmagnet. In der Simulation muss eine entsprechende Stimulierung des Sensor-Arrays über magnetische Feldgleichungen gelöst werden [7][10], wobei weitere Problemstellungen zur richtigen Dimensionierung oder Approximation des zu simulierenden Magnetfeldes auftreten.

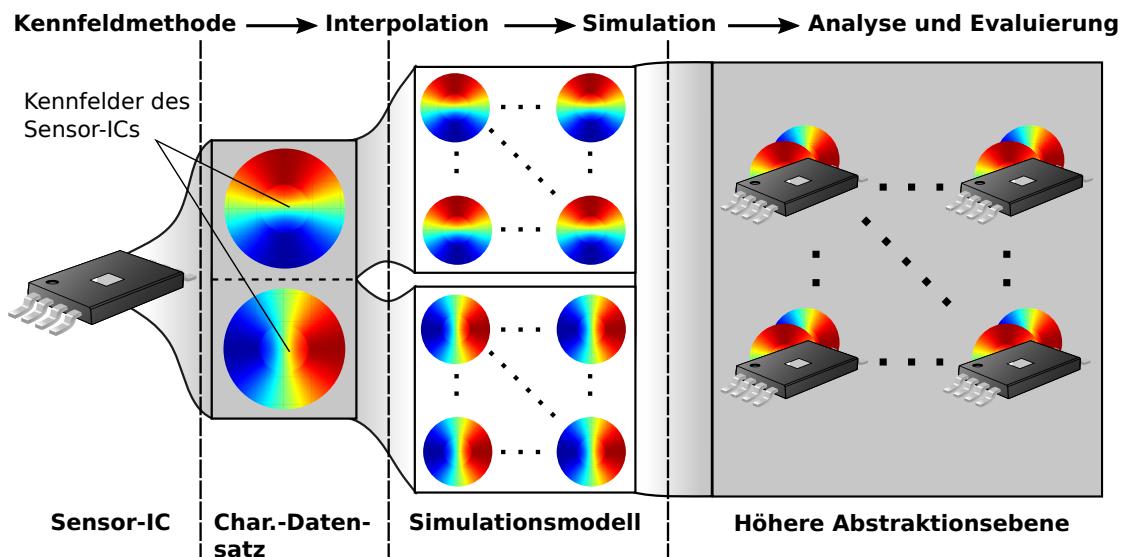


Abbildung 1.2: Ansatzdarstellung zur Generierung eines Simulationsmodells des magnetischen Sensor-Arrays. Sensor spezifische Charakteristiken (Kennfelder) werden in einem Charakterisierungsdatensatz gespeichert und im Anschluss das Verhalten des Einzelexemplars zu einem Sensor-Array interpoliert. Die Simulation des interpolierten Sensor-Arrays erzeugt eine höhere Abstraktionsebene, deren Ergebnisse wiederum in Simulationsdatensätze gespeichert sind und zur weiteren Analyse und Evaluierung genutzt werden können. Die Abstraktion der Kennfelder soll hier das Prinzip des Simulationsansatzes veranschaulichen. Im Simulationsmodell werden keine Arrays von Kennfeldern aufgebaut, sondern Charakteristiken des einzelnen Kennfeldes entnommen und interpoliert. Die grau unterlegten Abschnitte kennzeichnen Verfahrensschritte, in denen Datensätze zur Verfügung stehen oder erzeugt werden.

Das Sensor-Array-Modell, ob als Platinen-Modell oder Simulationsmodell, repräsentiert im Kontext nur die erste Hälfte eines modernen, vollwertigen Sensor-ICs. Seine Aufgabe besteht darin eine physikalische Anregung (Magnetfeld) in elektrische, analoge Signale umzuwandeln. Dieser Teil eines Sensor-ICs wird zumeist als Sensorkopf bezeichnet, da eine sinnbildliche darunter liegende Einheit die weitere Signalverarbeitung und -Auswertung übernimmt. Es handelt sich dabei um eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung, engl. Application-Specific-Integrated-Circuit (ASIC). Beide Teile zusammen, der Sensorkopf und das Signalverarbeitungs-ASIC, bilden ein vollständiges Sensor-IC mit der Fähigkeit zur modernen Signalverarbeitung. Unterstützend zeigt Abbildung 1.3 die allgemeine Aufbaubeschreibung eines Sensor-IC und Unterteilung in Sensorkopf und ASIC, respektive Signalerzeugung und Signalverarbeitung.

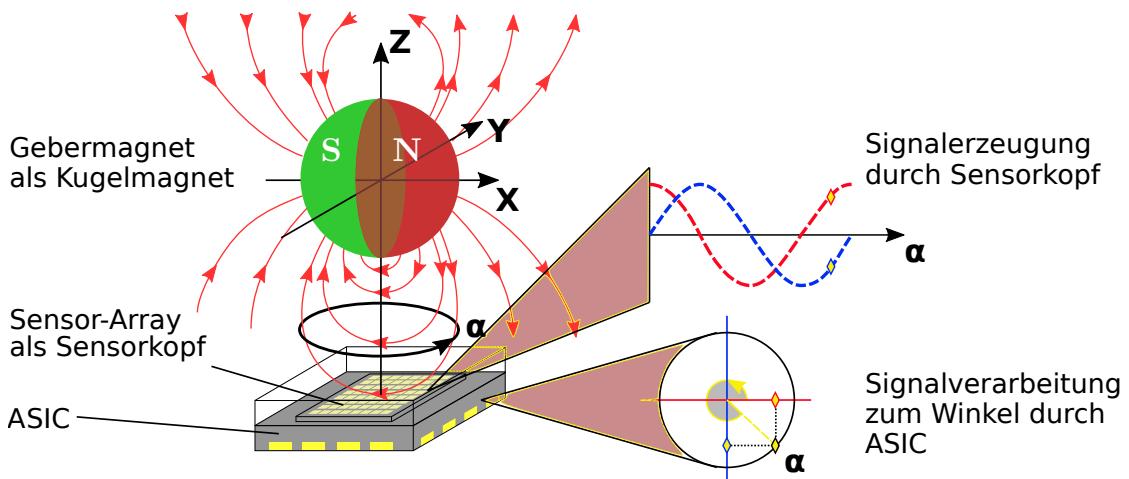


Abbildung 1.3: Veranschaulichung eines vollständigen Sensor-ICs für die Drehwinkel erfassung. Stark vereinfachte Darstellung eines Sensor-IC bestehend aus einem Sensorkopf und ASIC. Zu sehen sind die übergeordneten Aufgaben von Sensorkopf und ASIC. Der Sensorkopf erfasst die physikalische Stimulation (hier Kugelmagnetfeld) und setzt diese in analoge Signale um. Eine anschließende Signalverarbeitung findet im ASIC statt, der die elektrischen Signale zur entsprechenden Winkelausgabe abstrahiert. Dargestellt ist die Signalerzeugung eines einzelnen Punktes auf dem magnetischen Sensor-Arrays. Grafik entnommen und bearbeitet aus [14].

ASIC - Konzeptionierung der Kernfunktionalität

Derzeitig befinden sich die Forschungsprojektarbeiten für einen tauglichen ASIC in der Konzeptionsphase. Die Kernfunktionalität eines ASIC-Designs wird durch ein mathematisches Modell oder Verfahren abgebildet, dass in der Lage ist vom Sensorkopf erzeugte Messwerte adäquat und ausreichend schnell zu verarbeiten. Dabei muss ein solches Modell oder Verfahren grundlegende Eigenschaften des physikalischen Gesamtsystems in sich vereinigen und diese repräsentativ in den Gesamtkontext der Applikation setzen können. Im Kontext dieser Arbeit ist die Sensorapplikation, durch die Drehwinkelerfassung einer kreisförmigen Sensoranregung dargestellt, wie es in Abbildung 1.3 angedeutet ist.

Erfolgte Vorarbeiten der Arbeitsgruppe Sensorik für ein ASIC-Design, umfassen die Entwicklung eines mathematischen Modells und erste theoretische Simulationen [10][14]. Die Simulation bindet dabei Datensätze ein, die durch das Sensor-Array-Simulationsmodell erzeugt werden. Das mathematische Modell der ASIC-Kernfunktionalität ist auf Grundlage von Gauß-Prozessen für Regressionsverfahren entwickelt [1] worden. Die bisherigen Simulationsarbeiten beschränken sich auf mathematische Simulationen, die auf eine Gültigkeitsprüfung des mathematischen ASIC-Modells abzielen und Ansätze zur Modellqualifizierung und Qualitätskriterien für die Signalverarbeitung mit beinhalten.

1.2 Zielstellung

- Bezug zu Vorarbeiten
- Verfeinerung des Simulationsmodell des magnetischen Sensor-Arrays
- Skalierung des approximierten Kugelmagnetanregungsfeldes
- Optimierung des mathematischen Model für die ASIC-Kernfunktionalität
- Aufschlüsselung der Modellparameter
- Überführung von Skript basierten Entwürfen in Funktionsmodule
- Modularer Modellaufbau, der Modularerweiterungen zulässt

2 Grundlagen 0.0.2 19.02.2021

Das Fundament für die Drehwinkelerfassung mittels magnetischen Sensor-Array und lernender Signalverarbeitung [10][13][14] bildet das Regressionsverfahren für Gauß-Prozesse [1] und die damit verbundene Abstandsmessung von Winkelpositionen auf einer Kreisbahn. Für eine anschauliche Erklärung der Grundlagen, sollen die Zusammenhänge anhand einfacher Kreisdarstellung des Messprinzips eines einzelnen Winkelsensors gezeigt werden. Sodass dieses später in der Verwendung eines Sensor-Arrays adaptierbar ist und mittels geeigneter Rechen- und Normierungsverfahren auf die Problemstellung eines höherdimensionalen Systems projiziert werden kann.

2.1 Kreisdarstellung des klassischen Anwendungsfalls

Im klassischen Anwendungsfall, zu sehen in Abbildung 2.1, ist ein Gebermagnet räumlich zentriert über einen magnetischen Sensor platziert. Bei Drehung des Gebermagneten rotiert sein Magnetfeld entsprechend mit. Die Rotation findet um die Z -Achse des Gebermagneten statt. Die Nord-Süd-Ausrichtung des Magneten liegt in der X - bzw. Y -Achse des Koordinatensystems [3][6].

Der Winkelsensor misst, die zueinander und zur Rotationsachse orthogonal stehenden, X - und Y -Feldstärkenkomponenten des Gebermagneten H_x und H_y . Diese setzt der Winkelsensor in elektrische Spannungssignale um. Die Winkelstellung α des Magnet wird somit nicht direkt gemessen. Sie kann aber, mittels der gemessenen H_x und H_y Feldstärkenkomponenten, durch einfache Vektorrechnung berechnet werden.

Bei idealer und gleichbleibender Position des Gebermagneten in Relation zum Winkelsensor, liefern die aufgenommen H_x - / H_y -Messwerte eine Cosinus-Funktion $V_{cos}(H_x, H_y)$, sowie eine um 90° zur Cosinus-Funktion phasenverschobene Sinus-Funktion $V_{sin}(H_x, H_y)$. Genaue physikalische Größenzusammenhänge und technische Umsetzung sind dabei vorerst in Darstellung vernachlässigt.

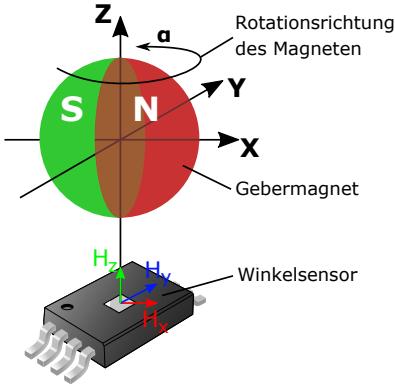


Abbildung 2.1: Klassischer Anwendungsfall für die Drehwinkelerfassung. Zeigt einen, um seine Z -Achse rotierenden, Gebermagneten und einen Winkelsensor in zentrierter und orthogonaler Ausrichtung zur Z -Achse des Magneten. Idealerweise befinden sich Magnet und Sensor, ohne Verkipplungen in X - oder Y -Richtung, parallel zueinander. Grafik entnommen und bearbeitet aus [13].

Durch die Phasenverschiebung der Sinus-Funktion stehen die Messwerte $V_{cos}(H_x, H_y)$ und $V_{sin}(H_x, H_y)$ vektoriell orthogonal zueinander. Bedingt durch die Orthogonalität der Messwerte $V_{cos}(H_x, H_y) \perp V_{sin}(H_x, H_y)$ und gleichförmige Kreisbewegung des Magneten um seine Z -Achse, beschreibt die Winkelmessung in polarer Darstellung eine konstante Kreisbahn. Diese besitzt einen konstanten Bahnradius r und die Winkelstellung α des Gebermagneten [10].

Für eine beliebige Winkelmessung \mathbf{A} , die eine entsprechende Winkelstellung α des Gebermagneten abbildet $\mathbf{A} \mapsto \alpha$, ergibt sich somit folgender vektorieller Zusammenhang in Gleichung 2.1 [14].

$$\underbrace{\begin{pmatrix} H_x(\alpha) \\ H_y(\alpha) \end{pmatrix}}_{\text{Gebermagnetfeld}} \Rightarrow \underbrace{\begin{pmatrix} V_{cos}(H_x, H_y) \\ V_{sin}(H_x, H_y) \end{pmatrix}}_{\text{Winkelsensormesswerte}} = \underbrace{\begin{pmatrix} r \cdot \cos(\alpha) \\ r \cdot \sin(\alpha) \end{pmatrix}}_{\text{Kreisdarstellung}} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}}_{\text{Winkelmessung}} = \mathbf{A}(\alpha) \quad (2.1)$$

Die so erhobenen Winkelmessung \mathbf{A} nach Gleichung 2.1, bildet ein eindimensionales Vektorfeld mit $\{a_x, b_x\} \in \mathbb{R}$ ab. Wobei sich der Bahnradius r für die Kreisdarstellung, aus dem Betrag der Messung $|\mathbf{A}|$, nach Gleichung 2.2 gewinnen lässt.

$$r = |\mathbf{A}| = \sqrt{(V_{cos}(H_x, H_y))^2 + (V_{sin}(H_x, H_y))^2} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (2.2)$$

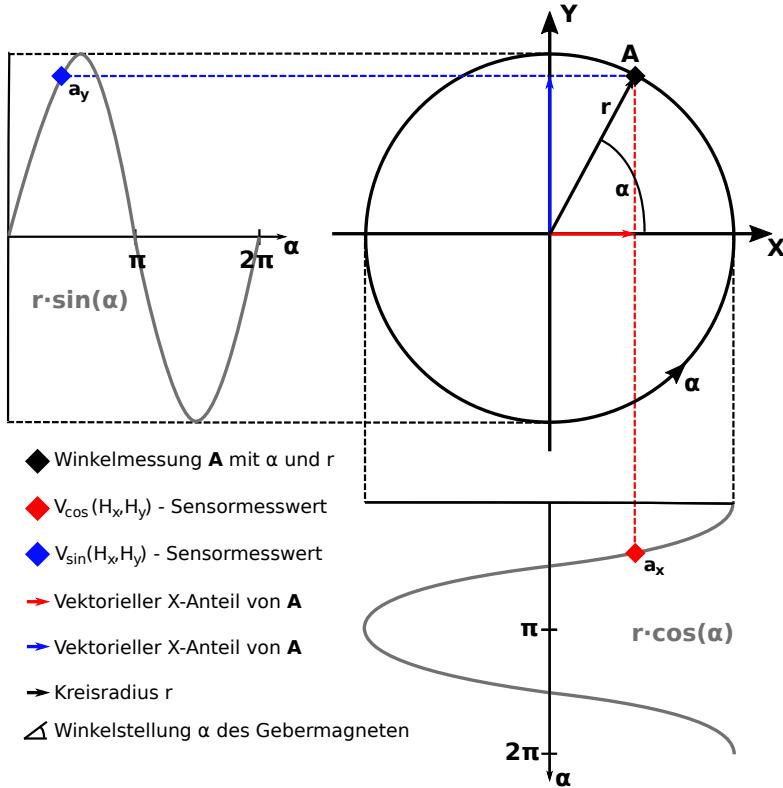


Abbildung 2.2: Kreisdarstellung der Winkelmessung. Als Abbildung der Winkelmessung $\mathbf{A} \mapsto \alpha$ aus Gleichung 2.1. Die Zusammensetzung der Messung erfolgt durch die vom Winkelsensor gemessenen, vektoriellen Anteile für die polare Darstellung der Gebermagnetwinkelstellung.

Der entsprechende Winkel des Gebermagneten lässt sich, mittels Überführung in Polarkoordinaten, nach Gleichung 2.3 zurückrechnen. Die Abbildung 2.2 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Messwerten und Abbildung der Gebermagnetwinkelstellung. Die Sinoiden Messergebnisse sind der arctan2 Funktion zuzuführen. Diese bildet einen Winkel von null bis π ab und besitzt eine Sprungstelle bei π . Der Y -Anteil kann dabei als Entscheider genutzt werden, um eine Abbildung des Winkels auf eine volle Kreisumdrehung (2π) umzusetzen.

$$\alpha = \begin{cases} \text{arctan2}(a_y, a_x) & \text{f. } a_y > 0 \\ \pi & \text{f. } a_y = 0 \\ \text{arctan2}(a_y, a_x) + 2\pi & \text{f. } a_y < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

2.2 Euklidischer Abstand in Normschreibweise

Um adäquate Bezüge bzw. Abstände zwischen einzelnen Messwerten herzustellen ist ein Wechsel der Betrachtungsweise notwendig. Es erleichtert die Handhabung der Problemstellung Vektorbeträge als normierte Längen und Distanzen zu sehen. Betrachtet man die vektoriellen Zusammenhänge, der klassischen Anwendung aus Abschnitt 2.1, in Normschreibweise. Ergibt sich der Radius r für eine Winkelstellung $\mathbf{A} \mapsto \alpha_1$ nach Gleichung 2.4. Die einzelnen Vektorelemente sind entsprechend der Vektor-2-Norm [4] zum Radius r normiert.

$$r = |\mathbf{A}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n |A_i|^2} = \|\mathbf{A}\|_2 \quad (2.4)$$

Es ist weithin von einer idealen Ausrichtung von Sensor und Gebermagnet wie in Abbildung 2.1 auszugehen. Somit bleibt der Kreisbahn Radius r für eine zweite Winkelstellung mit $\mathbf{B} \mapsto \alpha_2$ konstant.

$$r = \|\mathbf{A}\|_2 = \|\mathbf{B}\|_2 = \text{konst.} \quad (2.5)$$

Der direkte Abstand zwischen den beiden Winkelstellung $\mathbf{A} \mapsto \alpha_1$ und $\mathbf{B} \mapsto \alpha_2$ lässt sich geometrisch über den Satz des Pythagoras ermitteln. Dafür werden Abstandquadrate aus den Einzeldifferenzen der vektoriellen X -/ Y -Anteile gebildet. Das Resultierende Abstandsquadrat bildet mit seiner Kantenlänge dann den Winkelabstand zwischen beiden Winkelstellungen. Abbildung 2.3 veranschaulicht das Vorgehen.

$$\begin{aligned} d_E(\mathbf{A}, \mathbf{B}) &= \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} = \|\mathbf{A} - \mathbf{B}\|_2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Die Überführung in Normschreibweise des Abstandes ergibt nach Gleichung 2.6 eine Vektor-2-Differenznorm und ist allgemein als euklidischer Abstand bekannt. Analog dazu bildet sich das Quadrat nach Gleichung 2.7.

$$d_E^2 \langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = (a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 = \|\mathbf{A} - \mathbf{B}\|_2^2 \quad (2.7)$$

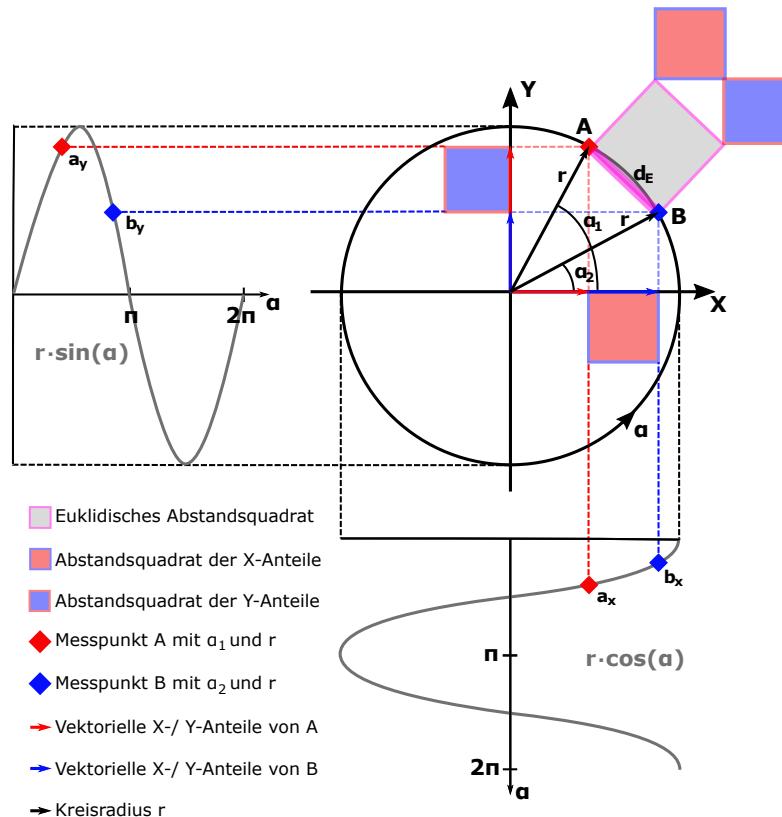


Abbildung 2.3: Allg. Kreisdarstellung des euklidischen Winkelabstands. Die Kreisdarstellung zeigt den euklidischen Winkelabstand zweier Winkelmesspunkte \mathbf{A} und \mathbf{B} mit gleichen Kreisradius r . Der euklidische Abstand, bzw. das Abstandsquadrat, zwischen den Winkelposition \mathbf{A} und \mathbf{B} ist zerlegt in Abstandsquadratanteile. Die Abstandquadratanteile ergeben sich aus der vektoriellen Zusammensetzung in X-/Y-Anteile für die einzelnen Messpunkte \mathbf{A} und \mathbf{B} .

Für Vektor-2-Normen muss die Dreiecksungleichung aus Gleichung 2.2 [4] gelten. Über die Ungleichung lassen sich Einzelnormen approximiert im Vergleich zu Differenznormen zwischen zwei Punkten **A** und **B** darstellen. Dieser Ansatz kann genutzt werden wenn die Bahnradius r nicht mehr konstant ist und somit $\|\mathbf{A}\|_2 \neq \|\mathbf{B}\|_2$ ist.

$$\begin{aligned} |\|\mathbf{A}\|_2 - \|\mathbf{B}\|_2| &\leq \|\mathbf{A} \pm \mathbf{B}\|_2 \leq |\|\mathbf{A}\|_2 + \|\mathbf{B}\|_2| \\ (\|\mathbf{A}\|_2 - \|\mathbf{B}\|_2)^2 &\leq \|\mathbf{A} \pm \mathbf{B}\|_2^2 \leq (\|\mathbf{A}\|_2 + \|\mathbf{B}\|_2)^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.3 Magnetische Sensoren und Drehwinkelerfassung

Magnetische Sensoren besitzen eine lange Tradition in der Automobilindustrie. Sie eignen sich besonders durch die berührungslose Erfassung von mechanischen Bewegungen und die kontaktlose Strommessung für den Einsatz in der Fahrzeugtechnik. Es existieren verschiedene Sensoren, die durch unterschiedliche magnetoresistive Effekte realisiert sind. Dabei bildet sich das Grundprinzip, durch anlegen eines äußeren Magnetfeldes und eine resultierende Änderung des elektrischen Widerstandes eines Materials [15].

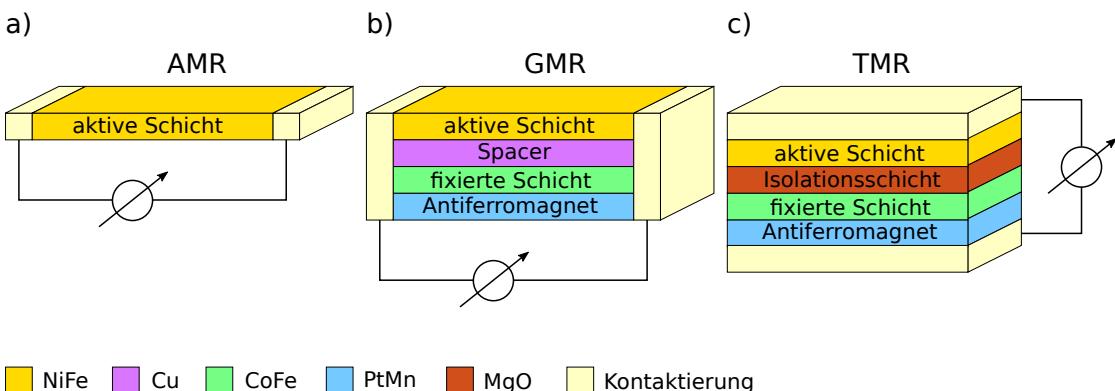


Abbildung 2.4: Schichtmodelle dreier magnetoresistiver Effekte. a) AMR-Effekt, schwache Widerstandsänderung. b) GMR-Effekt stärkere Widerstandsänderung. c) TMR-Effekt stärkste Widerstandsänderung. Grafik entnommen aus [5].

AMR-Effekt

In der Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckte der britische Physiker William Thomson den anisotropen magnetoresistiven Effekt (AMR). Der AMR-Effekt basiert auf einer von Strom- und Magnetisierungsrichtung abhängigen Streuung von Elektronen in einer einzelnen aktiven Schicht, Teil a) der Abbildung 2.4. Diese Schicht besteht in der Praxis oftmals aus einer Nickel-Eisen-Legierung. Die typische Variation der Widerstandsänderung $\Delta R/R$ liegt im Bereich von 2% bis 3% [15]. Für eine eindeutig Winkelmessung werden zwei Wheatstone'sche Brücken aus dem Schichtmaterial aufgebaut. Die Stromdurchflussrichtung ist horizontal. Bedingt durch den AMR-Effekt ist eine Periodizität von 180° abgedeckt [5][15]. Ein mittels AMR-Effekt entwickelter Sensor für die Drehwinkelerfassung, besitzt daher zwei um 45° verdrehte Wheatstone-Brücken. Durch die schwache Widerstandsänderung des Materials ist eine nachgeschaltet Verstärkerschaltung notwendig [3].

GMR-Effekt

Der gigantische magnetoresistive Effekt (GMR) ist 1988 von Grünberg und Fert entdeckt worden. Beide erhielten dafür 2007 den Nobelpreis für Physik, da unter Ausnutzung des GMR-Effekts sich die Speicherkapazität von Computerfestplatten stark erhöhen lies [5]. Das Minimalprinzip für einen solchen Sensor bildet sich aus zwei magnetischen Dünnschichten, die durch eine nicht magnetische Schicht (z.B. Kupfer) voneinander getrennt sind. Dabei folgt die Magnetisierung der aktiven Schicht (z.B. Nickel-Eisen) einem von außen angelegten Magnetfeld, während die Magnetisierung der zweiten Schicht (z.B. Kobalt-Eisen) durch eine darunter liegende antiferromagnetische Schicht (z.B. Platin-Mangan) fixiert ist. Die Stromdurchflussrichtung bleibt wie beim AMR horizontal [5][15]. Die Widerstandsänderung $\Delta R/R$ ist abhängig von der relativen Ausrichtung der Magnetisierungen in beiden magnetischen Schichten und liegt für einfache Schichtsystem, wie in Teil b) der Abbildung 2.4 gezeigt, bei etwa 10%. Die Herstellung eines GMR-Sensors ist deutlich aufwendiger, als es beim AMR-Effekt der Fall ist. So können aber in Multilagen mit vielfacher Wiederholung der magnetischen Schichten bis zu 80% $\Delta R/R$ erreicht werden [15]. Mit der GMR Technologie aufgebaute Drehwinkelsensoren haben eine Periodizität von 360° und besitzen zwei um 90° verdrehte Wheatstone-Brücken und ebenfalls nachgeschaltete Verstärkereinheiten [8].

TMR-Effekt

Im Jahr 1975 ist der tunnel-magnetoresistive Effekt (TMR) durch M. Jullière entdeckt worden. Im einfachsten Fall, wie Teil c) Abbildung 2.4 zeigt, tritt der Effekt bei Schichtsystemen auf, die durch eine isolierende Schicht (z.B. Magnesiumoxid) getrennt sind [5]. Die Stromdurchflussrichtung ist im Gegensatz zum AMR und GMR vertikal zu den Schichten. Die Widerstandsänderung $\Delta R/R$ erfolgt in Abhängigkeit zur relativen Ausrichtung der Magnetisierungen beider magnetischen Schichten, die an der Isolationsschicht angrenzen.

Wie beim GMR folgt die aktive Schicht einem äußeren Magnetfeld, ebenso ist die zweite Schicht durch eine antiferromagnetische Schicht fixiert [15]. Der zugrunde liegende Effekt ist aber physikalisch ein gänzlich anderer. Hier “tunnelt” der Stromfluss durch die Isolationsschicht. Das ist ein quantenmechanischer Effekt und kann mit Ansätzen der “normalen” Physik nicht mehr erklärt werden. Zurückzuführen ist der Effekt auf die Spin-Polarisation der einzelnen Elektroden eines magnetischen Tunnel-Kontaktes [15]. In praktischen Ausführungen bei Raumtemperatur liegen heute relative Widerstandsänderungen $\Delta R/R$ im Bereich von 30% bis zu 200% und sind somit deutlich höher als beim GMR [15]. Unter Laborbedingungen konnten bei sehr tiefen Temperaturen mittlerweile Widerstandsänderungen bis zu 1000% erreicht werden [5].

Praxistaugliche Ausführungen von TMR-Sensoren stehen erst seit einigen Jahren zur Verfügung. Die Herstellung eines Sensors erfordert einen enormen apparativen Aufwand und Produktionsanlagen mit entsprechenden Fertigkeiten mussten erst entwickelt werden. Der Aufwand ist mit Vorteilen gegenüber dem AMR- und GMR-Sensor entlohnt worden.

Somit besitzt ein TMR-Sensorelement einen viel höheren Widerstand bei gleicher Abmessung. Im Vergleich zu AMR/ GMR müssten diese flächenhungrige Strukturen realisieren. Aufgrund der vergleichsweise kleinen Flächen und einer äußerst geringeren Stromaufnahme ist ein engmaschiger Aufbau von Array-Strukturen möglich [5]. Die hohe Widerstandsänderung generiert entsprechend hohe Signalamplituden in der Magnetfelderfassung, daher kann eine nachgeschaltete Verstärkung entfallen. Es ist eine Periodizität von 360° abgedeckt. Ein TMR-Sensor für die Drehwinkelerfassung besteht aus zwei um 90° verdrehte Wheatstone-Brücken [6].

Wheatstone-Brücke

Ein einzelnes TMR-Element bzw. Widerstand kann bereits als eigenständiger magnetischer Sensor betrachtet werden. Allerdings können Temperatureinflüsse den Widerstand mitunter variieren lassen. Um den Temperatureinfluss entgegenzuwirken, sind daher Wheatstone'sche Brückenschaltungen genutzt. Die einzelnen Widerstände der Brücke sind dabei so angeordnet, dass sie einen gemeinsamen Temperaturkoeffizienten besitzen und entsprechend miteinander gleichmäßig schwanken. Über die Differenzmessung an den Brückenmittelabgriffen wird somit der Temperatureinfluss weitestgehend unterdrückt [6][15]. Abbildung 2.5 zeigt den Schematischen Brückenaufbau für einen TMR-Sensor. Bei gleichförmiger Rotation eines Anregungsmagnetfeld wird durch die 90° Verdrehung beider Brücken zueinander erreicht, dass diese benötigte Cosinus- und Sinus-Funktion, mit entsprechender Phasenverschiebung um 90° , für den Anwendungsfall in Abschnitt 2.1 ausgeben [6].

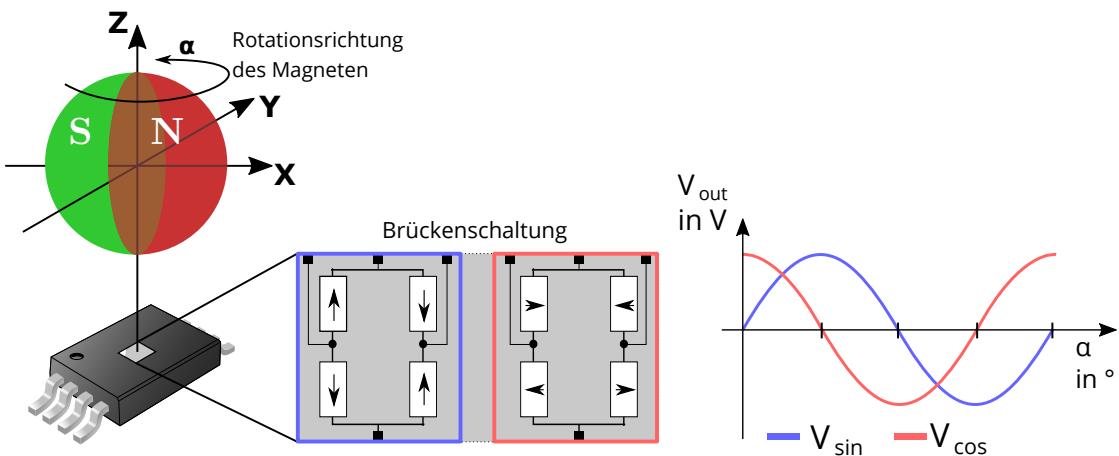


Abbildung 2.5: TMR Drehwinkelapplikation. Schematisch gezeigt für eine volle Rotation des Gebermagneten um 360° . Zu sehen sind die um 90° verdrehten Wheatstone-Brücken des Sensors. Die Brücken bilden, bei rotierenden Gebermagnetfeld, eine Sinus- und Cosinus-Funktion nach. Die Pfeile in den einzelnen Widerständen weisen auf ihre magnetische Ausrichtung hin. Grafik entnommen und bearbeitet aus [13].

2.4 Kennfeldmethode zur Charakterisierung von Sensoren

- Überleitung von Sensorbrückenschaltung
- Messprinzip für das Erstellen der Sensorbrücken-Kennfelder
- Festlegung von Arbeitsbereich (Plateau TMR), Sättigung (KMZ60)
- Dimensionierung des Stimulus, Dipole Anregung

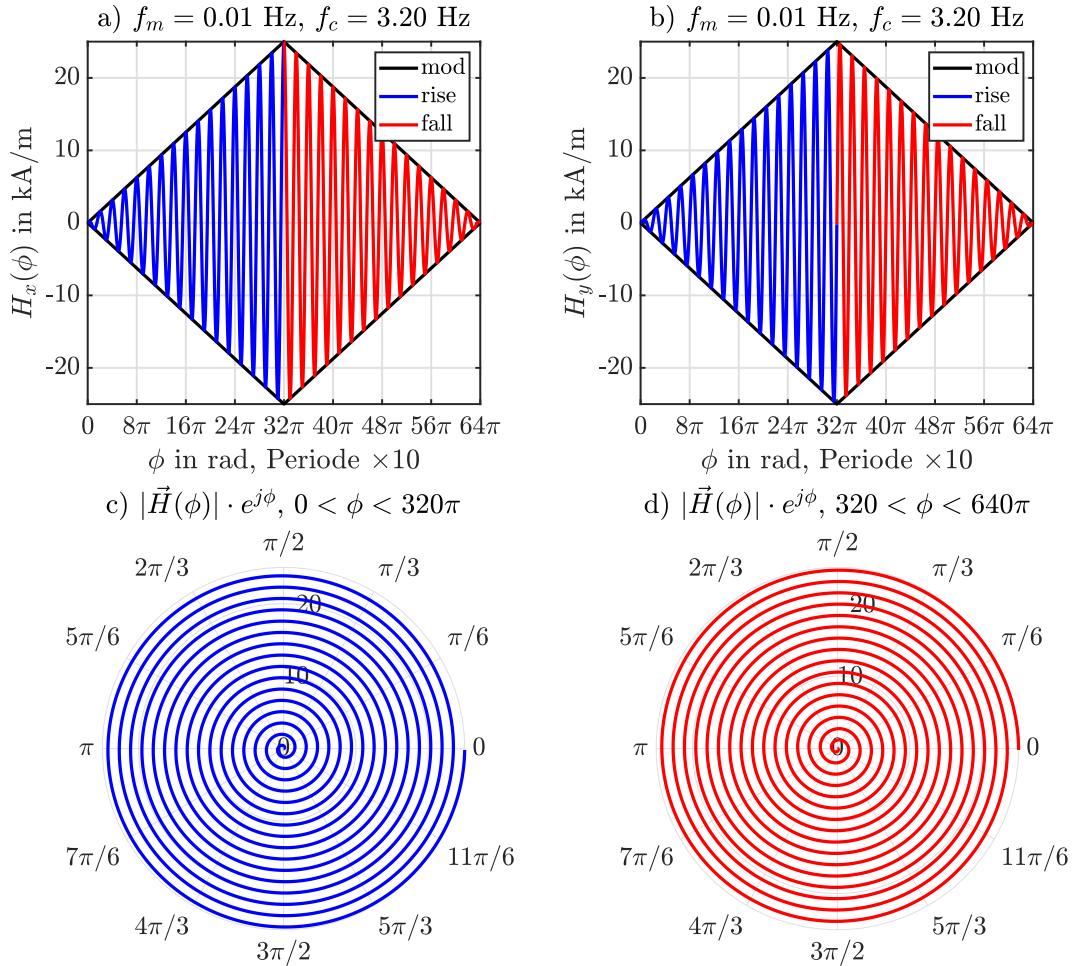


Abbildung 2.6: Magnetfeldstimulus zur Erzeugung von Sensorkennfeldern. Es sind die Bestandteile des magnetischen Sensorstimuli dargestellt, die zum Ausmessen des Sensorkennfeldes in H_x - und H_y -Richtung verwendet worden sind. Es ist das Prinzip des Verfahrens dargestellt. In a) und b) ist die Dreiecksmodulation des magnetischen Anregungsfeldes abgebildet. Für a) die H_x -Feldanregung mit Cosinus-Trägerwelle und für b) die H_y -Feldanregung mit Sinus-Trägerwelle. Es sind für beide Anregungsrichtungen niedrige Frequenzen gewählt um ein quasi-statisches Anregungsmagnetfeld zu erzeugen. Es ergeben sich für die Betragssamplitude des Stimulus, in polärer Darstellung c) und d), konzentrische Trajektorien. Diese verlaufen von Innen nach Außen für die steigende Flanke der Amplitudenmodulation c) und von Außen nach Innen für die fallende Flanke d). Die Dreieckmodulationsfrequenz liegt bei $f_m = 0,1 \text{ Hz}$ und einer Trägerwellenfrequenz $f_c = 3,2 \text{ Hz}$. Grafik nachempfunden aus [10].

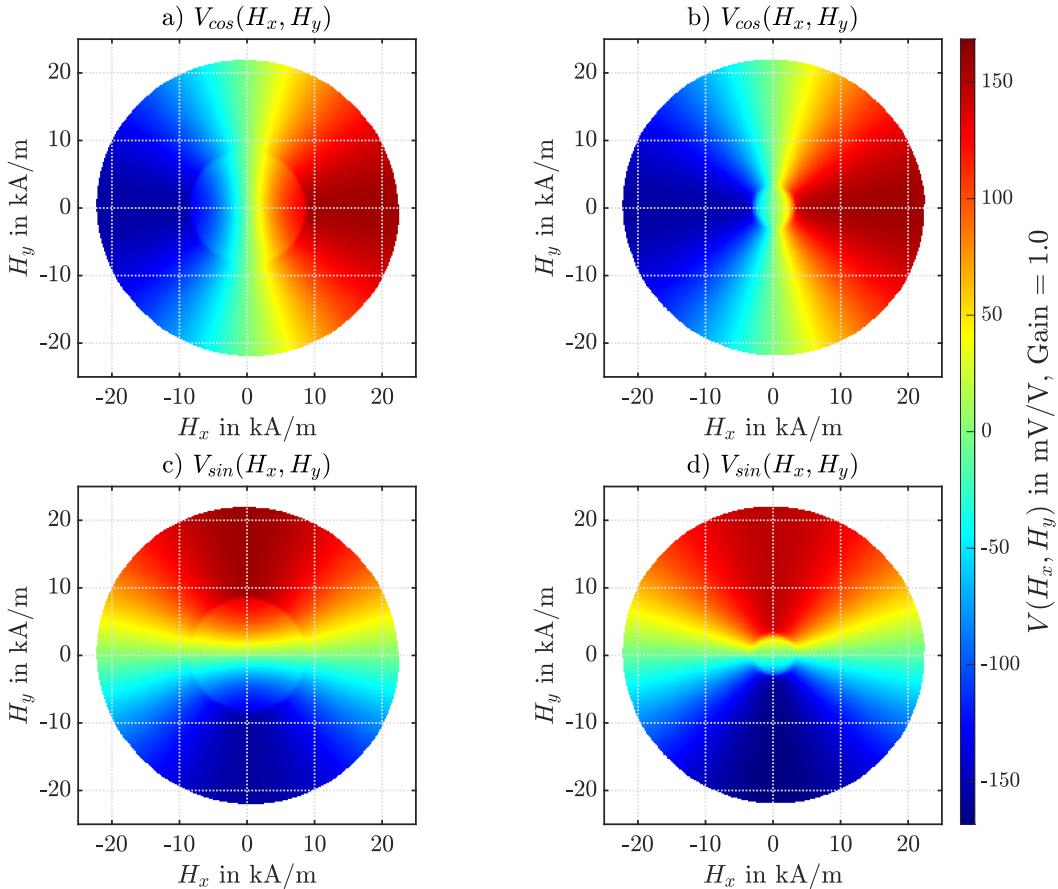


Abbildung 2.7: TDK TAS2141-AAAB Winkelsensorbrückenkennfelder. Zu sehen sind die Kennfelder der Cosinus-Brücke a) und b). Darunter befinden sich die Kennfelder der Sinus-Brücke c) und d). Die Kennfelder für beide Brücken a) und c) beziehen sich auf die steigenden Flanke der Amplitudenmodulation aus Abbildung 2.6 und die in b) bzw. d) gezeigten Kennfelder sind gewonnen aus der fallenden Flanke. Die Brückenkennfelder sind normiert in mV V^{-1} . Für eine Spannungsausgabe in Betriebsspannungsniveau ist keine zusätzliche Verstärkung notwendig. Die Kennfelder besitzen, jeweils in H_x - und H_y -Richtung, eine Schrittweite von $0,1961 \text{ kA m}^{-1}$ und sind skaliert von -25 kA m^{-1} bis 25 kA m^{-1} . Somit ergibt sich eine Bildauflösung für ein Kennfeld von 256×256 Messpunkten. Grafik nachempfunden aus [10].

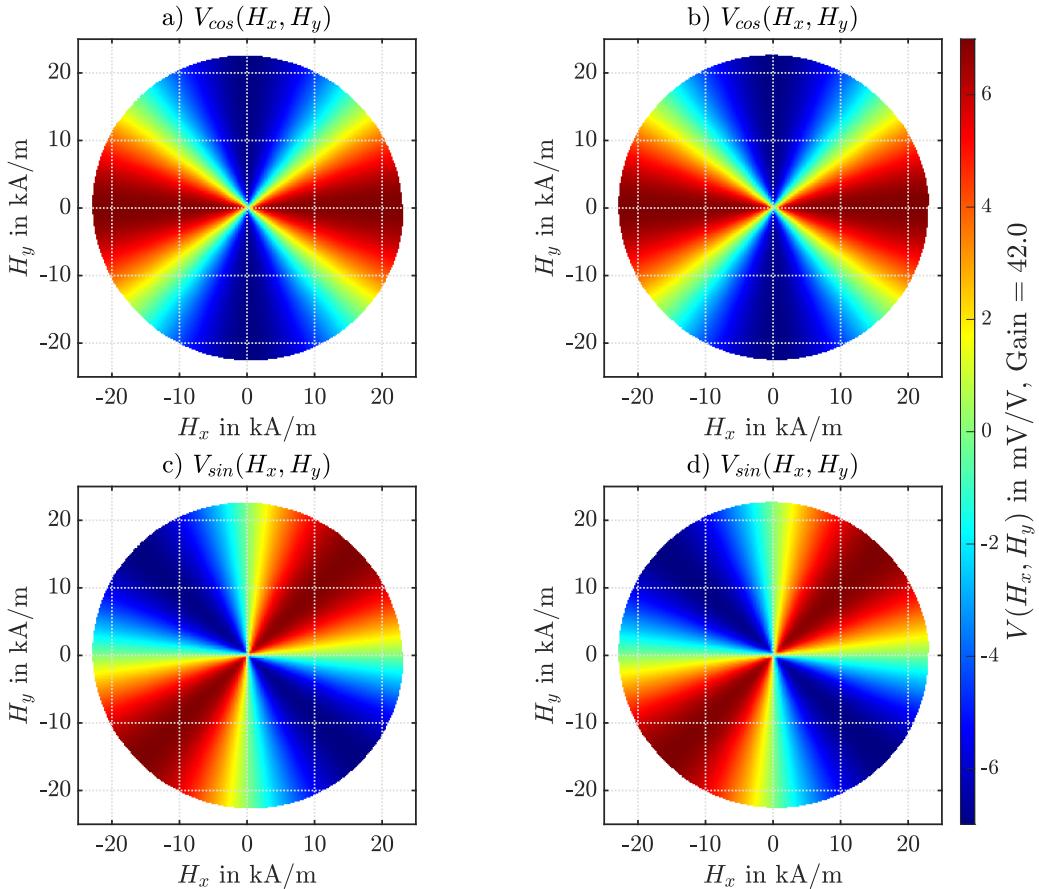


Abbildung 2.8: NXP KMZ60 Winkelsensorbrückenkennfelder. Zu sehen sind die Kennfelder der Cosinus-Brücke a) und b). Darunter befinden sich die Kennfelder der Sinus-Brücke c) und d). Die Kennfelder für beide Brücke a) und c) beziehen sich auf die steigenden Flanke der Amplitudenmodulation aus Abbildung 2.6 und die in b) bzw. d) gezeigten Kennfelder sind gewonnen aus der fallenden Flanke. Die Brückenkennfelder sind normiert in mV V^{-1} . Für eine Spannungsausgabe in Betriebsspannungsniveau ist eine zusätzliche Verstärkung um Faktor 42 notwendig. Die Kennfelder besitzen, jeweils in H_x - und H_y -Richtung, eine Schrittweite von $0,1961 \text{ kA m}^{-1}$ und sind skaliert von -25 kA m^{-1} bis 25 kA m^{-1} . Somit ergibt sich eine Bildauflösung für ein Kennfeld von 256×256 Messpunkten. Grafik nachempfunden aus [10].

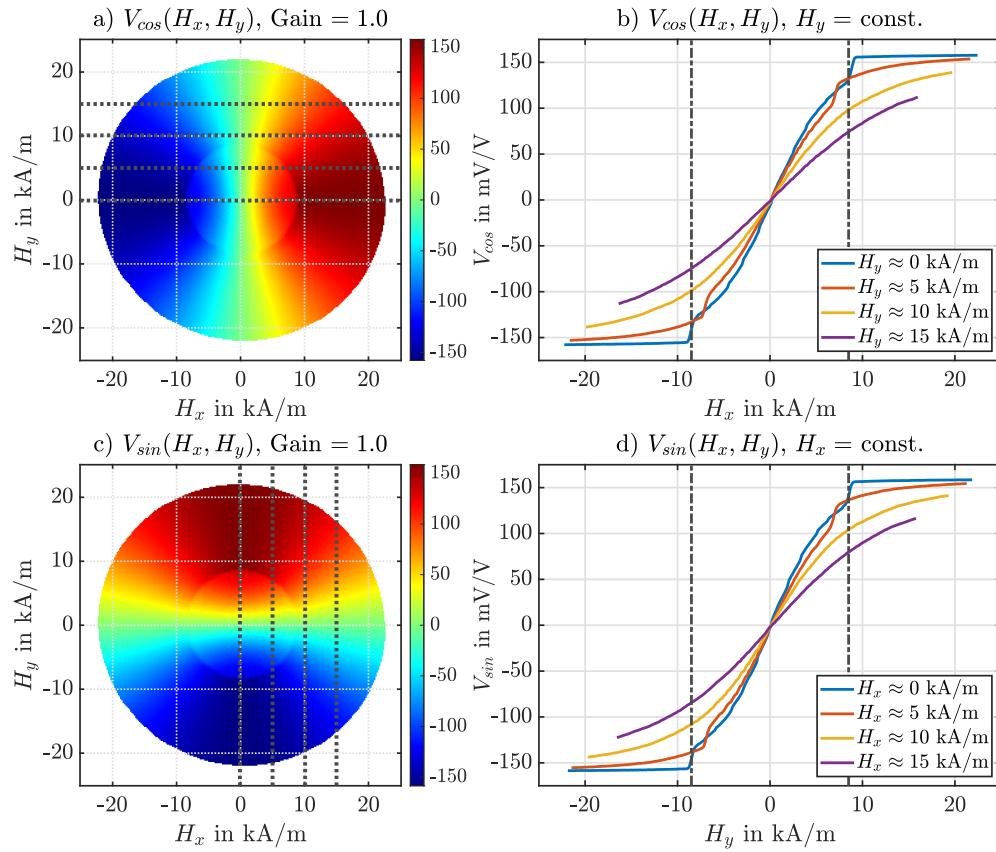


Abbildung 2.9: TDK TAS2141-AAAB Kennfeldquerschnitte. Für die Kennfelder gewonnen aus steigender Amplitudenmodulation a) und c). Es sind Querschnitte durch die jeweiligen Kennfelder in b) und d) abgebildet. Für V_{cos} a), b) verschiedene konstante H_y und V_{sin} c), d) entsprechend verschiedene konstante H_x Querschnitte. Grafik nachempfunden aus [10].

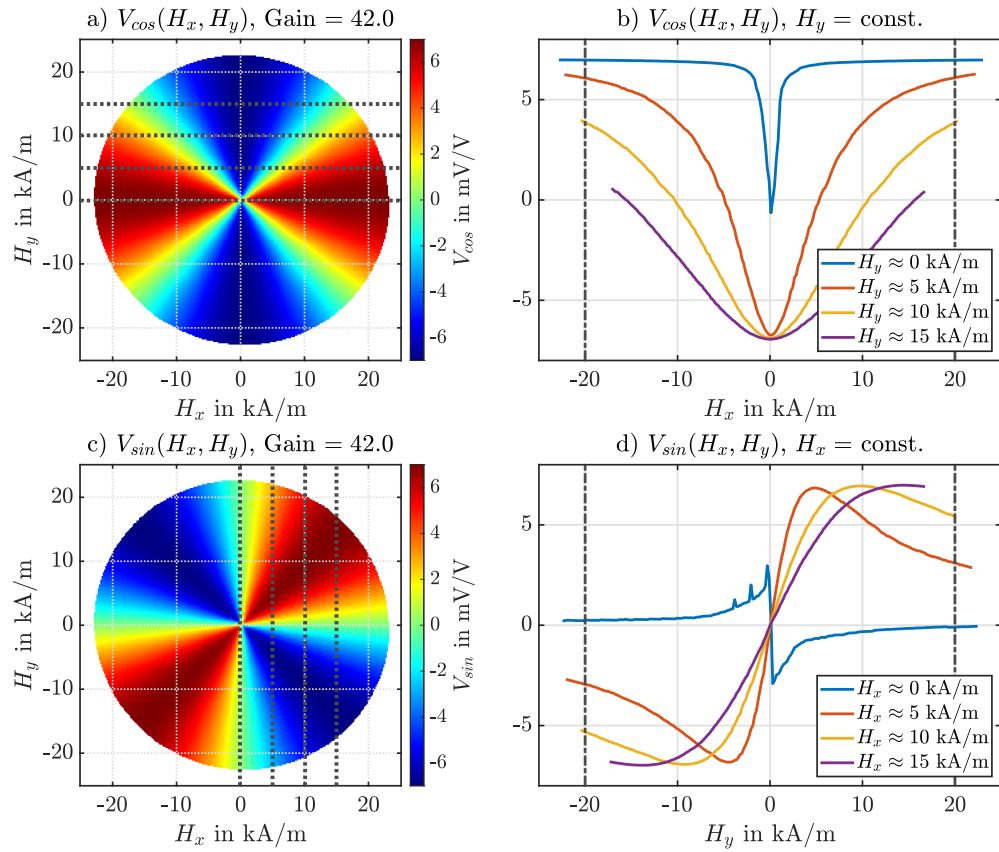


Abbildung 2.10: NXP KMZ60 Kennfeldquerschnitte. Für die Kennfelder gewonnen aus steigender Amplitudenmodulation a) und c). Es sind Querschnitte durch die jeweiligen Kennfelder in b) und d) abgebildet. Für V_{cos} a), b) verschiedene konstante H_y und V_{sin} c), d) entsprechend verschiedene konstante H_x Querschnitte. Grafik nachempfunden aus [10].

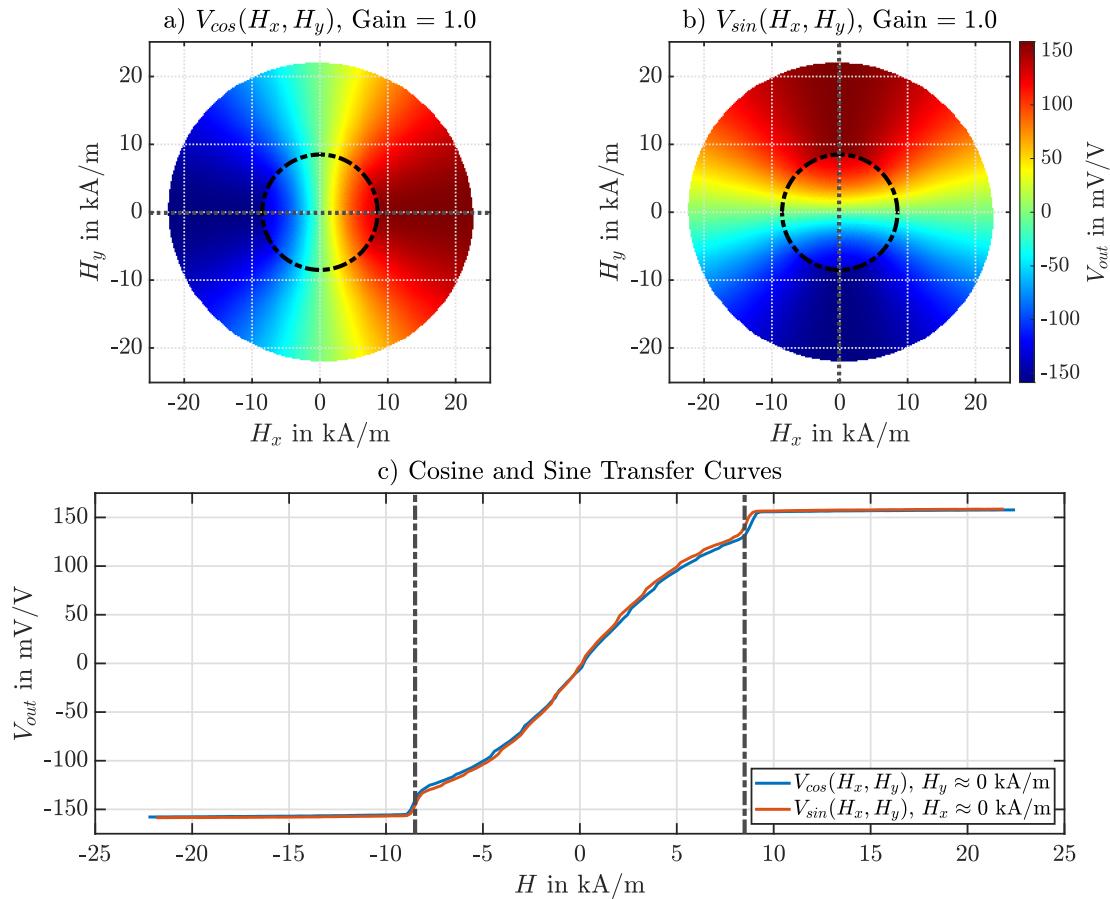


Abbildung 2.11: TDK TAS2141-AAAB Übertragungskennlinie. Es sind wieder die Kennfelder aus der steigenden Amplitudenmodulation in a) und b). In c) sind die Übertragungskennlinien für den Sensor gezeigt mit Kennzeichnung für den Betrieb auf dem linearen Plateau des Kennfeldes bei $8,5 \text{ kA m}^{-1}$. Ebenfalls zu sehen in a) und b) durch die sich ergebene Kreisbahn mit einem Radius des aufgelegten Intervalls aus c). Grafik nachempfunden aus [10].

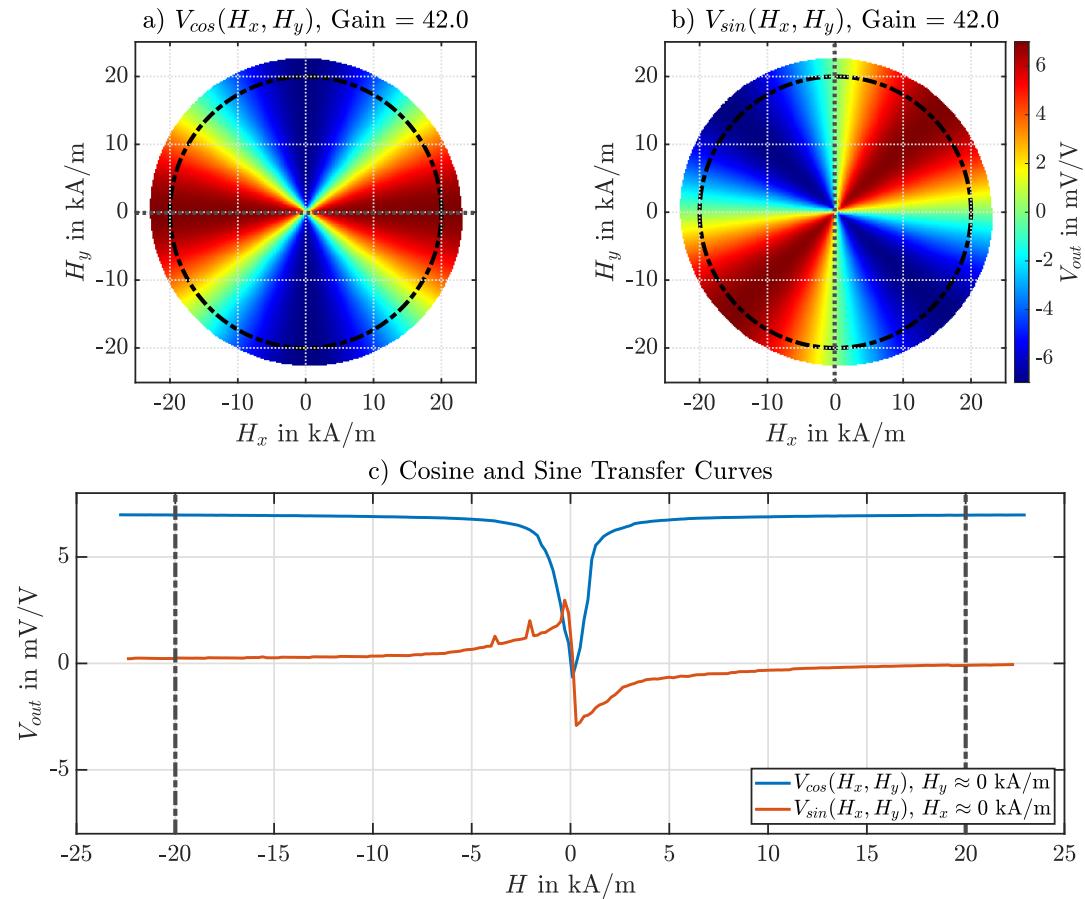


Abbildung 2.12: NXP KMZ60 Übertragungskennlinie. Es sind wieder die Kennfelder aus der steigenden Amplitudenmodulation in a) und b). In c) sind die Übertragungskennlinien für den Sensor gezeigt mit Kennzeichnung für den Betrieb in Sättigung bei 20 kA m^{-1} . Ebenfalls zu sehen in a) und b) durch die sich ergebene Kreisbahn mit einem Radius des aufgelegten Intervalls aus c). Grafik nachempfunden aus [10].

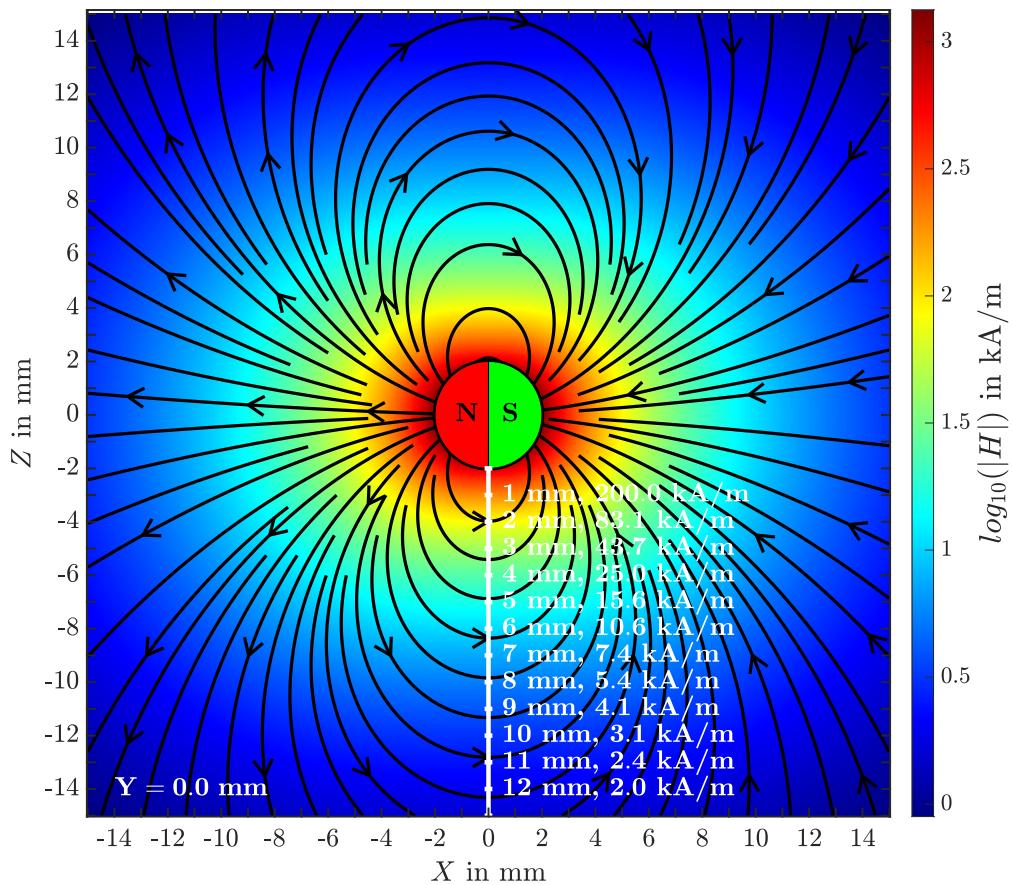


Abbildung 2.13: Approximierter Kugelmagnet. Die Approximation des Kugelmagneten erfolgt über Dipol-Feldgleichung in Näherung des Kugelmagnetfernfeldes. Das Magnetfeld ist auf 200 kA m^{-1} bei einem Abstand von 1 mm zur Kugelmagnetoberfläche normiert. Der Radius des Kugelmagneten beträgt 2 mm.

2.5 Prinzip des Sensor-Arrays

- geometrischer Aufbau
- Brückenausgangsspannungen
- Resultierende Array-Datenformate und Darstellung der Sinoiden

2.6 Sensor-Array-Simulation über Dipol-Feldgleichung

- Erzeugen des Meshgrids
- Normieren des Magnetfeldes
- Erzeugen von Rotationsmomenten (inkl. Verkippung)
- Referenzierung zu Kennfeldern und Gewinnung der Brückenspannungen (interp2 nearest neighbor)

2.7 Gauß-Prozesse für Regressionsverfahren

- Erläuterung des Regressionsverfahren im allg.
- Bedeutung und Kriterien der Kovarianzfunktion, Spiegel der Applikation
- Herleitung der Quadratischen Frobenius Kovarianzfunktion mit Bezug zum Einheitskreis
- Möglichkeiten zur Mittelwertschätzung und -Korrektur
- Optimierungskriterien in der Trainingsphase
- Qualitätskriterien in der Arbeitsphase

3 Software-Entwicklung für Optimierungsexperimente 0.0.2 19.02.2021

3.1 Aufgabe und Funktionen der Software

- Identifizierung der Grundfunktionen
- Datengenerierung
- Datenanalyse
- Sonderfunktion
- Darstellungs- und Plot-Funktionen

Die Software-Entwicklung erfolgt unter dem Gesichtspunkt zur Durchführung von Versuchsreihen zu Parameterfindung und teilweise auf Zwischenergebnissen basieren. Gut strukturierte Archivierung von Ergebnisse. Graphische Unterstützung von Auswertung.

3.2 Aufbau und Vorgehen

- Skriptbasierte Entwurfsarbeit
- Überführen in modularen Aufbau von Kernfunktion
- Parametrierte Steuerung der Software über Zentrale Konfigurierung
- Ausführbare Skripte (Einbindung von Modulen und nutzen der Konfigurierung)
- Speicherung von Ergebnissen in Datensätzen

- Versionierung der Arbeitsschritte

3.3 Sensor-Array-Simulation

- Zuordnung Datengenerierung
- Nutzung von vorarbeiten
- Darstellung des Modul-Funktionsablaufdiagramm
- Darstellung des Algorithmus für die Simulation mehrere Positionen
- Nutzung des Moduls für eingestellte Konfigurierung

3.4 Gauß-Prozess-Regression

- Zuordnung Datenanalyse
- Nutzung von Vorarbeiten
- Darstellung des Modul-Funktionsablaufdiagramm
- Aufbau der Modell-Engine und Schnittstellen für neue Kovarianzfunktionen
- Darstellung der einzelnen Optimierungsverfahren und Aufzeigen der Unterschiede im vorgehen
- Nutzung des Moduls für eingestellte Konfigurierung

4 Erprobungs- und Optimierungsexperimente 0.0.1

13.01.2021

- Klassifizierung (Diagnose)
- Stabilitätskriterium
- Fehlererkennung Max. Mittelwert, Qualitätsmaß
- Allg. Vorgehen "Batch-Job"
- Konfigurierung der Simulationssoftware

4.1 Festlegung des Startpunktes

- Startpunkt, 1. Position gleich Anlernpunkt für Trainingsphase
- Auswahl des Senortyps
- Konfigurierung des Magneten
- Auswahl des GPR-Modells nach Optimierung
- Konfigurierung des GPR-Modells mit ermittelten Parametern

4.2 Festlegung des Verfahrweges ohne Verkippung

- Vorbetrachtung des Magnetsfeldes
- Aufteilung in Sektoren
- Abfahren in Z-Richtung ohne Versatz
- Festlegen des X-Y-Versatzes, Symmetrie-Sektor

4.3 Simulationsdurchführung

- Festhalten der Ergebnisse
- Position, Winkelfehler (Max, Mittel), Qualitätsmaß (Max, Mittel)
- Drift-Darstellung

5 Auswertung 0.0.1 13.01.2021

5.1 Gegenüberstellung der GPR-Modelle

- Aufwand der Trainingsphase
- Nötige Parameter und zu Speichernde Werte
- Arbeitsphase, Genauigkeit, Fehlererkennung, Stabilität

6 Zusammenfassung und Bewertung 0.0.1

13.01.2021

- Kurzdarstellung der Ergebnisse der Arbeit
- Offene Punkte und Probleme
- Ansätze zur Weiterführung für zukünftige Arbeiten
- Bewertung der Ergebnisse in Bezug auf die Anwendung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Platinen-Sensor-Array im Maßstab 1:25	3
1.2	Ansatzdarstellung zur Generierung eines Simulationsmodell des magnetischen Sensor-Arrays	4
1.3	Veranschaulichung eines vollständigen Sensor-ICs für die Drehwinkelerfassung	5
2.1	Klassischer Anwendungsfall für die Drehwinkelerfassung	9
2.2	Kreisdarstellung der Winkelmessung	10
2.3	Allg. Kreisdarstellung des euklidischen Winkelabstands	12
2.4	Schichtmodelle dreier magnetoresistive Effekte	13
2.5	TMR Drehwinkelapplikation	16
2.6	Magnetfeldstimulus zur Erzeugung von Sensorkennfeldern	18
2.7	TDK TAS2141-AAAB Winkelsensorbrückenkennfelder	19
2.8	NXP KMZ60 Winkelsensorbrückenkennfelder	20
2.9	TDK TAS2141-AAAB Kennfeldquerschnitte	21
2.10	NXP KMZ60 Kennfeldquerschnitte	22
2.11	TDK TAS2141-AAAB Übertragungskennlinie	23
2.12	NXP KMZ60 Übertragungskennlinie	24
2.13	Approximierter Kugelmagnet	25

Tabellenverzeichnis

A.1 Genutzte Software	39
---------------------------------	----

Glossar

AMR-Effekt Anisotroper-Magnetoresistiver-Effekt.

Arbeitsgruppe Sensorik Die Arbeitsgruppe Sensorik steht unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider und ist unter dem Department Informations- und Elektrotechnik Teil der Fakultät Technik un Informatik an der HAW Hamburg.

GMR-Effekt Riesiger-Magnetoresistiver-Effekt.

HAW Hamburg Die HAW Hamburg ist die Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg und war die ehemalige Fachhochschule am Berliner Tor.

Sensorkopf Signal erzeugender Teil eines Sensor-ICs, dem eine Einheit zur weiteren Signalverarbeitung nachgeschaltet ist.

TMR-Effekt Tunnel-Magnetoresistiver-Effekt.

Abkürzungen

AMR Anisotrope-Magnetoresistance.

ASIC Application-Specific-Integrated-Circuit.

CPU Prozessorkern.

HDD Festplattenlaufwerk.

IC Integrated-Circuit.

ISAR Integrated-Sensor-Array.

OS Betriebssystem.

RAM Arbeitsspeicher.

SW Software.

TMR Tunnel-Magnetoresistance.

Literatur

- [1] C. E. Rasmussen und C. K. I. Williams. *Gaussian Processes for Machine Learning*. MIT Press, 2006. ISBN: 026218253X. URL: www.gaussianprocess.org/gpml (besucht am 30.10.2020).
- [2] R. Johnson. *MATLAB Style Guidelines 2.0*. Version 2. MATLAB Central File Exchange, 2014. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46056-matlab-style-guidelines-2-0> (besucht am 21.09.2020). Online.
- [3] NXP Semiconductors. *KMZ60 Angle sensor with integrated amplifier*. Datenblatt, 2014.
- [4] R. A. van de Geijn. *Notes on Vector and Matrix Norms*. The University of Texas Austin, 2014.
- [5] H. Lemme. *Messung durch den Tunnel*. Hrsg. von Elektroniknet. 2016. URL: <https://www.elektroniknet.de/messen-testen/sensorik/messung-durch-den-tunnel.133265.html> (besucht am 25.01.2021). Online.
- [6] TDK. *TMR Angle Sensor TAS2141-AAAB*. Datenblatt, 2016.
- [7] H. Pape. „Simulation und Auswertung von Permanentmagneten für manetoresistive Sensor-Arrays“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2017.
- [8] infineon. *TLE5x09A16(D) Analog AMR/GMR Angle Sensors*. Datenblatt, 2018.
- [9] T. Mehm. „Schaltungsentwurf und Mikrocontrollersteuerung für ein Tunnel-Magnetoresistives Sensor-Array“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2019.
- [10] T. Schüthe, A. Albounyan und K. Riemschneider. „Two-Dimensional Characterization and Simplified Simulation Procedure for Tunnel Magnetoresistive Angle Sensors“. In: *Sensors Applications Symposium (SAS)*. (13. März 2019). IEEE, 2019. DOI: [10.1109/SAS.2019.8706125](https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706125). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8706125> (besucht am 05.10.2020). Online.

- [11] Bitbucket. *Feature Branch Workflow in Git*. Hrsg. von ATlassian. 2020. URL: <https://www.atlassian.com/de/git/tutorials/comparing-workflows/feature-branch-workflow> (besucht am 10.09.2020). Online.
- [12] J. Ernsting. „Funktionsdemonstrator für magnetische Sensor-Arrays auf Basis des Mikrocomputers Raspberry PI“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2020.
- [13] T. Schütte u. a. „Positionserfassung mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magnetoresistiven Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung“. In: *8. Fachtagung Sensoren im Automobil*. 2020.
- [14] T. Schütte u. a. „Positionserfassung mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magnetoresistiven Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung“. In: *Tille T. (eds) Automobil-Sensorik 3*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020. ISBN: 978-3-662-61259-0. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-61260-6_14.
- [15] T. Tille. *Automobil-Sensorik-3*. Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-662-61259-0.

A Genutzte Software 0.0.3 08.01.2021

Für die Nachvollziehbarkeit der getätigten Entwicklungsarbeiten und die Erstellung der Bachelor-Thesis, ist das dafür jeweilige Betriebssystem (OS) und die verwendete Software (SW) tabellarisch aufgeführt. Es finden sich genutzte Versionen der SW und Angaben zur Minimalanforderung für deren Nutzung. Die Anforderungen sind für Prozessorkern (CPU), Arbeitsspeicher (RAM), Festplattenlaufwerk (HDD) näher aufgeschlüsselt. Die Programmierarbeiten mit MATLAB sind jeweils mit Windows und Linux geschrieben bzw. getestet worden.

Software	Verwendungszweck (Typ)	Min.-Anforderung	Version	Erscheinungstag
Ubunut Budgie	Linux-Betriebssystem (Laptop OS)	2 GHz Dual-Core-CPU 4 GB RAM 25 GB freier HDD-Speicher	18.04 LTS	26.04.2018
Windows 10 Enterprise	Windows-Betriebssystem (Laptop OS)	1 GHz Core-CPU 1 GB RAM 32 GB freier HDD-Speicher	1909	12.11.2020
MATLAB	Simulationssoftware (Multi-Paradigmen Programmier- Sprache, IDE)	Intel/ AMD x86-64 CPU 4 GB RAM 3.5 GB freier HDD-Speicher	2020b	17.09.2020
Git	Versionierung (Kommandozeilenprogramm)	-	2.29	29.10.2020
Inkscape	Vektorgrafikzeichenprogramm (Grafikaufbereitung)	1 GHz CPU 256 MB RAM 302 MB freier HDD-Speicher	0.92.3	11.03.2018
Texstudio	Textbearbeitung f. LaTeX Dokumente (Editor)	- - 24.7 MB freier HDD Speicher	2.12.6	25.07.2020
wkhtmltopdf	HTML- zu Pdf-Konvertierung	- -	0.12.6	11.06.2020
JabRef	Literaturverwaltungsprogramm f.BibLaTeX (Editor)	- -	5.1	30.08.2020

Tabelle A.1: Genutzte Software zur Erstellung der Thesis und Dokumentation der Ergebnisse, Entwicklungsumgebung für die geschriebene Simulationssoftware zur Generierung und Auswertung der Sensor-Array-Simulation.

B Software-Dokumentation 0.0.4

13.01.2021

Die Software-Dokumentation ist automatisiert mit MATLAB-Skripten erstellt worden. Es ist dafür ein zweistufiger Prozess implementiert, der im ersten Schritt eine in MATLAB integrierte HTML-Dokumentation erstellt und im Anschluss diese zu eigenständigen PDF-Dateien exportiert. Als letzter Schritt sind diese zu einem LaTeX-Manual zusammengefasst im Anhang eingebunden. Mit diesem Verfahren ist es möglich, eine Dokumentation direkt aus geschriebenen M-Dateien zu generieren. Allerdings ist es dafür nötig, eine spezielle Formatierung und einen gewissen Programmierstil einzuhalten [2]. Die Dokumentation enthält neben dem erstellten Quellcode eine Reihe von Arbeitsanweisungen, wie mit der Software umzugehen ist. Zusätzlich sind Beschreibungen für die Erstellung und Pflege des Software-Projektes mit beigefügt. Die geschriebene Software ist mithilfe des Software-Versionierungsprogramms Git erstellt worden, was eine genaue Nachvollziehbarkeit in Bezug auf die einzelnen Arbeitsschritte ermöglicht. Zur Versionierung ist der Git-Feature-Branch-Workflow [11] angewandt worden. Aus stilistischen Gründen ist die gesamte Software-Dokumentation in Englisch verfasst.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original