

# 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

<b>1 Motivation 0.0.1 17.02.2021</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Vorarbeiten 0.0.1 19.02.2021 . . . . .	2
1.2 Zielstellung 0.0.1 19.02.2021 . . . . .	7
<b>2 Grundlagen 0.0.2 19.02.2021</b>	<b>8</b>
2.1 Magnetische Sensorentypen und mechatronische Anwendung . . . . .	12
2.2 Kennfeldmethode zur Charakterisierung von Sensoren . . . . .	14
2.3 Prinzip des Sensor-Arrays . . . . .	23
2.4 Sensor-Array-Simulation über Dipol-Feldgleichung . . . . .	23
2.5 Gauß-Prozesse für Regressionsverfahren . . . . .	23
<b>3 Software-Entwicklung für Optimierungsexperimente 0.0.2 19.02.2021</b>	<b>24</b>
3.1 Aufgabe und Funktionen der Software . . . . .	24
3.2 Aufbau und Vorgehen . . . . .	24
3.3 Sensor-Array-Simulation . . . . .	25
3.4 Gauß-Prozess-Regression . . . . .	25
<b>4 Erprobungs- und Optimierungsexperimente 0.0.1 13.01.2021</b>	<b>26</b>
4.1 Festlegung des Startpunktes . . . . .	26
4.2 Festlegung des Verfahrweges ohne Verkippung . . . . .	27
4.3 Simulationsdurchführung . . . . .	27
<b>5 Auswertung 0.0.1 13.01.2021</b>	<b>28</b>
5.1 Gegenüberstellung der GPR-Modelle . . . . .	28
<b>6 Zusammenfassung und Bewertung 0.0.1 13.01.2021</b>	<b>29</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>30</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>31</b>

*Inhaltsverzeichnis*

---

<b>Glossar</b>	<b>32</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>33</b>
<b>Literatur</b>	<b>34</b>
<b>Anhang</b>	<b>35</b>
<b>A Genutzte Software 0.0.3 08.01.2021</b>	<b>36</b>
<b>B Software-Dokumentation 0.0.4 13.01.2021</b>	<b>37</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>38</b>

# 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 Bremssystem eingesetzt. Neuentwicklungen in der Halbleitertechnik, auf Basis des TMR-Effekts, ermöglichen den Aufbau komplexerer Sensorstrukturen [9]. 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 [13].

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 0.0.1 19.02.2021

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 [8][11] 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.

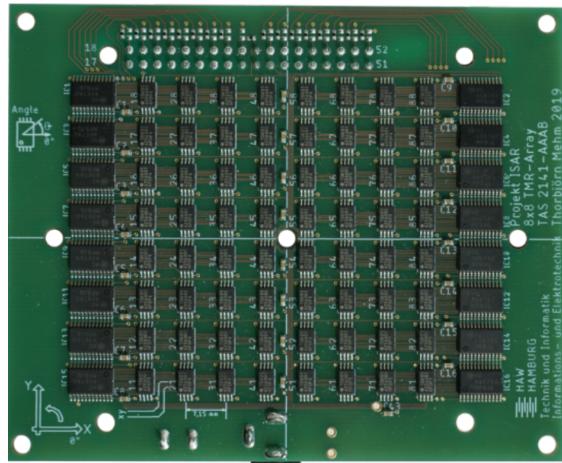


Abbildung 1.1: Platinen-Sensor-Array im Maßstab 1:25 aufgebaut als  $8 \times 8$  Sensor-Array, dass als Aufsteckmodul für eine Mikrocontroller getriebene Signalverarbeitung bereitsteht [8]. Die einzelnen Sensoren sind in Sensorbänken angeordnet. Die Anordnung erfolgt in eine linke und rechte Sensorbank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

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.

### **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 [9] 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 Möglichkeiten 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][9], wobei weitere Problemstellungen zur richtigen Dimensionierung oder Approximation des zu simulierenden Magnetfeldes auftreten.

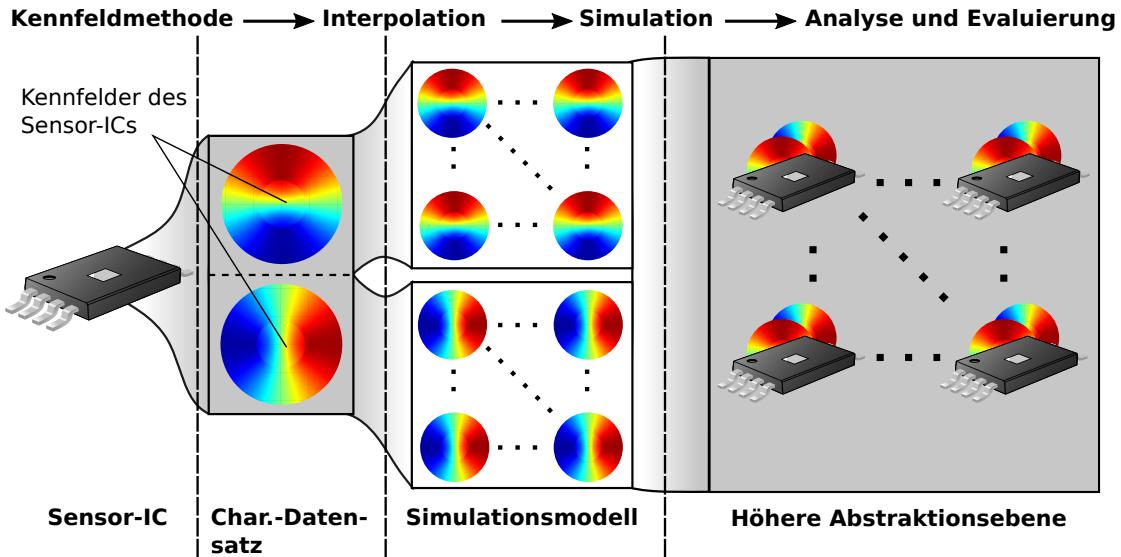


Abbildung 1.2: Ansatzdarstellung zur Generierung eines Simulationsmodell des magnetischen Sensor-Arrays. Sensor spezifische Charakteristiken (Kennfelder) werden in einem Charakterisierungsdatensatz gespeichert und im Anschluss das Verhalten des Einzelexemplars zu einem Sensor-Array interpoliert. Die 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.

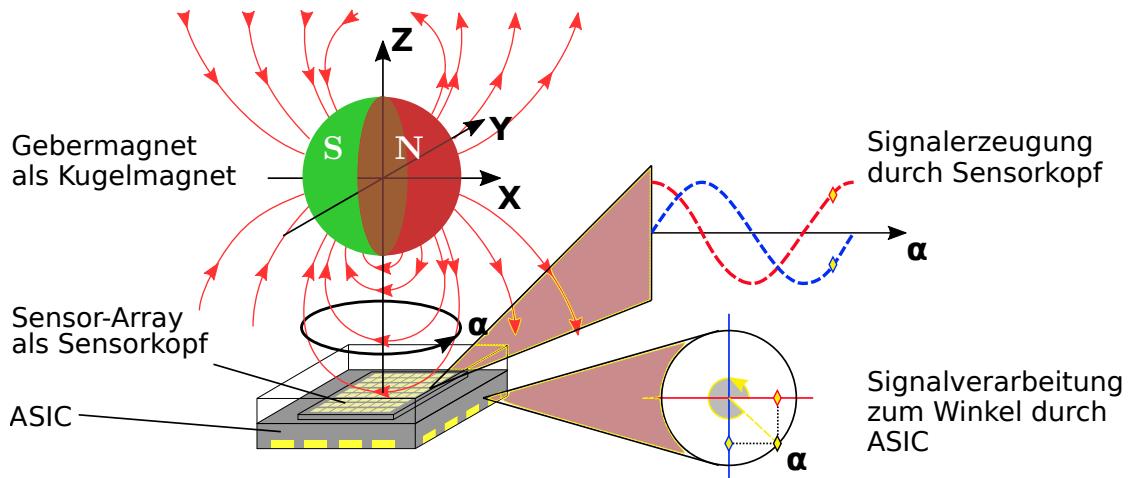


Abbildung 1.3: Veranschaulichung eines vollständigen Sensor-ICs für die Drehwinkelerfassung. Stark vereinfachte Darstellung eines Sensor-IC bestehend aus einem Sensorkopf und ASIC. Zu sehen sind die übergeordneten Aufgaben von Sensorkopf und ASIC. Der Sensorkopf erfasst die physikalische Stimulation (hier Kugelmagnetfeld) und setzt diese in analoge Signale um. Eine anschließende Signalverarbeitung findet im ASIC statt, der die elektrischen Signale zur entsprechender Winkelangabe abstrahiert. Dargestellt ist die Signalerzeugung eines einzelnen Punktes auf dem magnetischen Sensor-Arrays. Grafik entnommen und bearbeitet aus [13].

### 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 [9][13]. 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 0.0.1 19.02.2021

- 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 [9][12][13], die auf Regressionsverfahren für Gauß-Prozesse [1] aufbauen, bildet sich durch Abstandsmessungen von Winkelpositionen auf einer Kreisbahn. Für eine anschauliche Erklärung der Zusammenhänge soll als Einstieg in die Grundlagen, das Prinzip anhand eindimensionaler Vektorfelder zweier Winkelstellungen  $A$  und  $B$  gezeigt werden. Das entspräche einem Anwendungsfall einfacher und heute erhältlicher magnetischer Sensoren, wie dem KMZ60 [3] von NXP, oder dem TAS2141-AAAB [6] der Firma TDK. Die Verfahrensgrundlage, der eindimensionalen Betrachtung, wird in der Verwendung von Sensor-Arrays adaptiert und durch geeignete Rechen- und Normierungsverfahren auf die Problemstellung eines höherdimensionalen Systems projiziert.

Der in Abbildung 1.3 gezeigte Anwendungsfall, soll hier als Grundlage der Erläuterungen dienen. Genaue technische und physikalische Größenzusammenhänge sind vorerst vernachlässigt. Abbildung 1.3 zeigt eine kreisförmige Rotation des Gebermagneten um seine  $Z$ -Achse. Entsprechend rotiert das Magnetfeld bei Drehung des Magneten mit. Der darunter liegende Sensor erfasst die Magnetfeldstärke  $\vec{H}$  des Gebermagnetfeldes. Die Winkelstellung  $\alpha$  des Magneten kann dabei nicht direkt erfasst werden. Der Sensor misst, die zueinander und zur Rotationsachse orthogonal stehenden,  $X$ - und  $Y$ -Komponenten der Gebermagnetfeldstärke  $\vec{H}$  und setzt diese in elektrische Spannungssignale um. Bedingt durch die Kreisbewegung und Orthogonalität, lässt sich die Winkelstellung mittels einfacher Vektorrechnung bestimmen.

Bei idealer und gleichbleibender Position des Magneten in Relation zum Sensor, beschreiben die aufgenommenen Messpunkte eine Kreisbahn mit konstanten Bahnradius  $r$  und Winkelstellung  $\alpha$  des Gebermagneten. Abbildung 2.1 zeigt den Zusammenhang für zwei erfasste Winkelstellungen  $A$  und  $B$ . Es ergeben sich für die beiden Winkelstellungen  $A \mapsto \alpha_1$  und  $B \mapsto \alpha_2$  folgende vektorielle Zusammenhänge in Gleichung 2.1.

$$\begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cdot \cos(\alpha_1) \\ r \cdot \sin(\alpha_1) \end{pmatrix} \\ B &= \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cdot \cos(\alpha_2) \\ r \cdot \sin(\alpha_2) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Die vom Sensor erfassten und umgewandelten  $X$ - und  $Y$ -Komponenten der Messpunkte  $A$  oder  $B$ , bilden eindimensionale Vektorfelder. Über ihren Betrag lässt sich der Bahnradius  $r$  ermitteln, zu sehen in Gleichung 2.2. Allgemein ist der Betrag eines Vektors über die Vektor-2-Norm zu berechnen. Diese Norm wird oft auch als euklidische Norm bezeichnet.

$$\begin{aligned} r := \|A\|_2 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n |A_i|^2} = \sqrt{|a_x|^2 + |a_y|^2} = |A| = \text{konst.} \\ &\equiv \\ \|B\|_2 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n |B_i|^2} = \sqrt{|b_x|^2 + |b_y|^2} = |B| = \text{konst.} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Der direkte Winkelabstand zwischen  $A$  und  $B$  kann geometrisch, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, über die Abstandsquadrate der vektoriellen Anteile ermittelt werden und ist gleich der Kantenlänge des Quadrates zwischen den Punkten  $A$  und  $B$ . Entsprechend der Kreisbahnnormierung für die Messpunkte, ist diese Form der Abstandsermittlung als euklidischer Abstand  $d_E(A, B)$  bezeichnet. Zu berechnen ist der Abstand  $d_E(A, B)$  nach Gleichung 2.3 als Vektor-2-Norm der vektoriellen Differenz von  $A$  und  $B$ .

$$d_E(A, B) = \|A - B\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2} \quad (2.3)$$

Für den euklidischen Abstand zwischen zwei Winkelstellungen  $d_E(A, B)$  und das Quadrat des Abstandes  $d_E^2(A, B)$  muss die Dreiecksungleichung nach Gleichung 2.4 für allgemeine Vektor-2-Normen gelten [4]. Dieser Zusammenhang kann genutzt werden um eine Kreisbahn zu approximieren, wenn der Bahnradius  $r$  nicht konstant und  $\|A\|_2 \neq \|B\|_2$  ist.

$$\begin{aligned} |\|A\|_2 - \|B\|_2| &\leq \|A \pm B\|_2 \leq \|\|A\|_2 + \|B\|_2\| \\ (\|A\|_2 - \|B\|_2)^2 &\leq \|A - B\|_2^2 = d_E^2(A, B) \end{aligned} \quad (2.4)$$

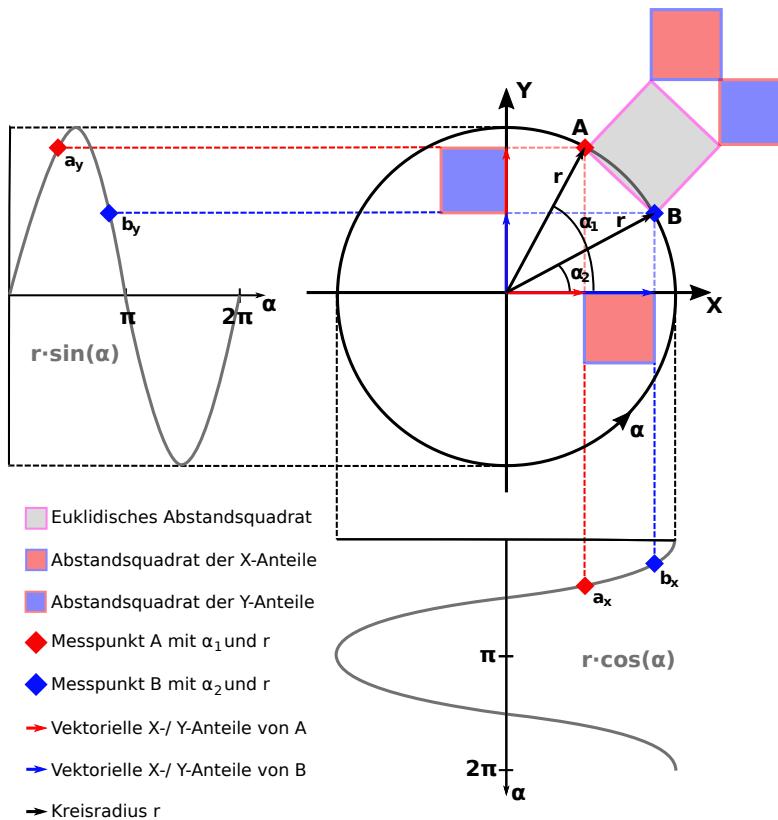


Abbildung 2.1: Allg. Kreisdarstellung des euklidischen Winkelabstands. Die Kreisdarstellung zeigt den euklidischen Winkelabstand zweier Winkelmesspunkte  $A$  und  $B$  mit gleichen Kreisradius  $r$ . Der euklidische Abstand, bzw. das Abstandsquadrat, zwischen den Winkelposition  $A$  und  $B$  ist zerlegt in Abstandsquadratanteile. Die Abstandquadratanteile ergeben sich aus der vektoriellen Zusammensetzung in X-/Y-Anteile für die einzelnen Messpunkte  $A$  und  $B$ .

Bei konstant bleibenden Bahnradius  $r$  befindet sich der Abstand  $d_E(A, B)$  im Intervall  $0 \leq d_E(A, B) \leq \sqrt{2} \cdot r$ . Die Winkelstellungen des Gebermagnet lassen sich über die Vektoranteile der Messpunkte und den Bahnradius  $r$  berechnen. Also eine Überführung aus kartesischer Darstellung der Messpunkte in ihre Polarkoordinaten aus Gleichung 2.1. Hier in Gleichung 2.5 für beliebige Messpunkte auf der Kreisbahn gezeigt.

$$\cos(\alpha) = \frac{x}{r} \quad \sin(\alpha) = \frac{y}{r} \quad \tan(\alpha) = \frac{y}{x} \quad (2.5)$$

$$\alpha' = \begin{cases} +\arccos\left(\frac{x}{r}\right) & \text{f. } \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) \geq 0 \\ -\arccos\left(\frac{x}{r}\right) + 2\pi & \text{f. } \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

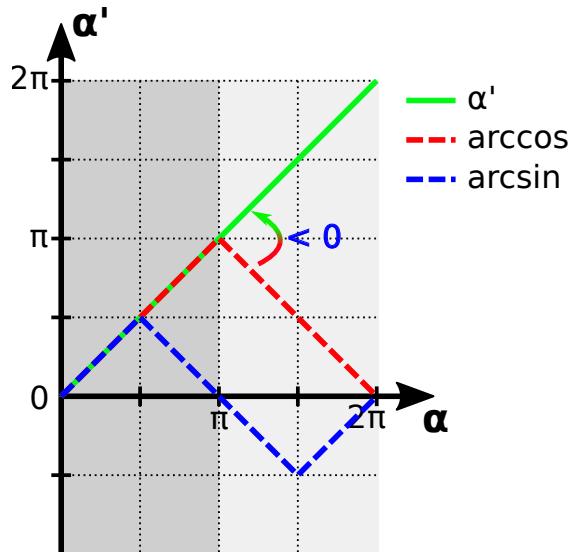


Abbildung 2.2: Winkelberechnung mit Bereichsumschaltung. Die Berechnung des Winkel  $\alpha'$  erfolgt über die  $\arccos$  und  $\arcsin$  Funktion, bzw. die vektoriellen Anteile der Messpunkte. Die  $\arcsin$  Funktion bildet dabei den Schwellwert für die Bereichsumschaltung um eine volle Rotation abzubilden.

- Einleitung Aufgabenfeld
- Einheitskreis
- Bezug zur Drehwinkelerfassung und Sensorapplikation

## 2.1 Magnetische Sensorentypen und mechatronische Anwendung

- Die Technologie mit der ein Sensorkopf realisiert ist, klassifiziert in der Regel die Sensorbezeichnung. Anhänge in der Bezeichnung wie AMR oder TMR, geben somit Auskunft darüber welche Technologie für die Realisierung des Sensorkopfes die Grundlage bildet.
- Anwendungsfall Winkelmessung
- Aufbau Sensorbrücke TMR (Umriss aus Datenblatt)
- Ausblick TMR Drehzahlmessung und Strommessung

Die Konzipierung magnetischer Sensoren für die Drehwinkelerfassung richtet sich auf die Erfassung eines kreisförmigen Anregungsmagnetfeldes mit einer Feldstärke  $\vec{H}$ . Also ein kreisförmig rotierendes Magnetfeld, zumeist erzeugt durch einfache zweipolige Gebermagneten. Die räumliche Anordnung der Anwendung ist in Abbildung 1.3 zu sehen. Das Magnetfeld rotiert um die Z-Achse des Sensors. Zur Detektion des Magnetfeldes bzw. seiner Rotation sind dessen Anteile in X- und Y-Richtung genutzt. Die Nord-Südausrichtung des Gebermagneten liegt dabei in der X- bzw. Y-Achse der Anwendung, bestehend aus Magnet und Sensor. Die Magnetfeldst des Gebermagneten ist durch seine vektoriellen Anteile in X, Y und Z-Richtung beschrieben [7]. Weitere

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Die Einheit der Feldstärke  $\vec{H}$  ist  $\text{A m}^{-1}$ . Gängige Feldstärkengrößen für eine magnetische Anregung von Drehwinkelsensoren liegen Bereich  $\text{kA m}^{-1}$ .

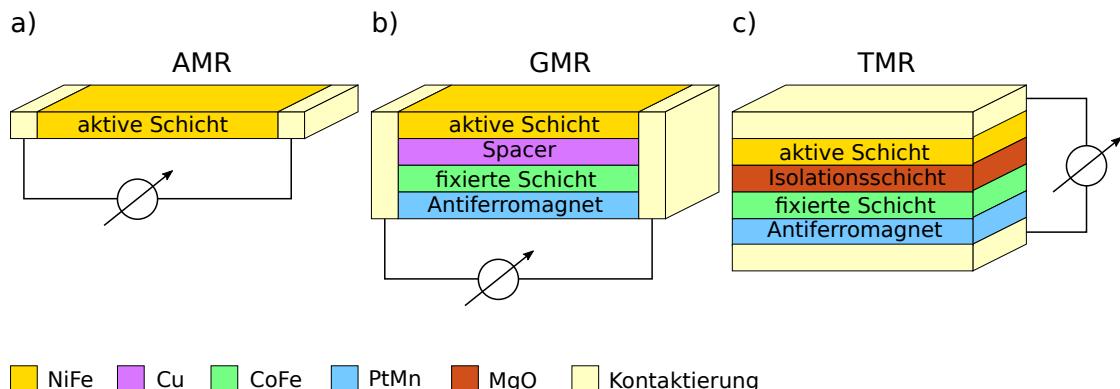


Abbildung 2.3: Schichtmodelle dreier magnetoresistiver Effekte. a) AMR-Effekt, schwache Widerstandsänderung. b) GMR-Effekt stärkere Widerstandsänderung. c) TMR-Effekt stärkste Widerstandsänderung. Grafik entnommen aus [5].

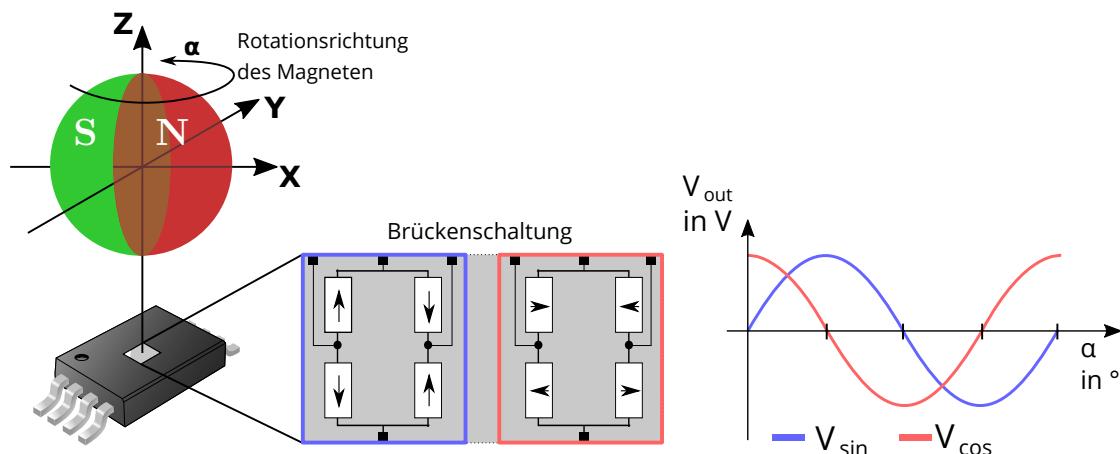


Abbildung 2.4: TMR Drehwinkelapplikation. Schematisch gezeigt für eine volle Rotation des Gebermagneten um  $360^\circ$ . Zu sehen sind die um  $90^\circ$  verdrehten Wheatstone-Brücken des Sensors. Die Brücken bilden, bei rotierenden Gebermagnetfeldern, eine Sinus- und Cosinus-Funktion nach. Die Pfeile in den einzelnen Widerständen weisen auf ihre magnetische Ausrichtung hin. Grafik entnommen und bearbeitet aus [12].

## 2.2 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

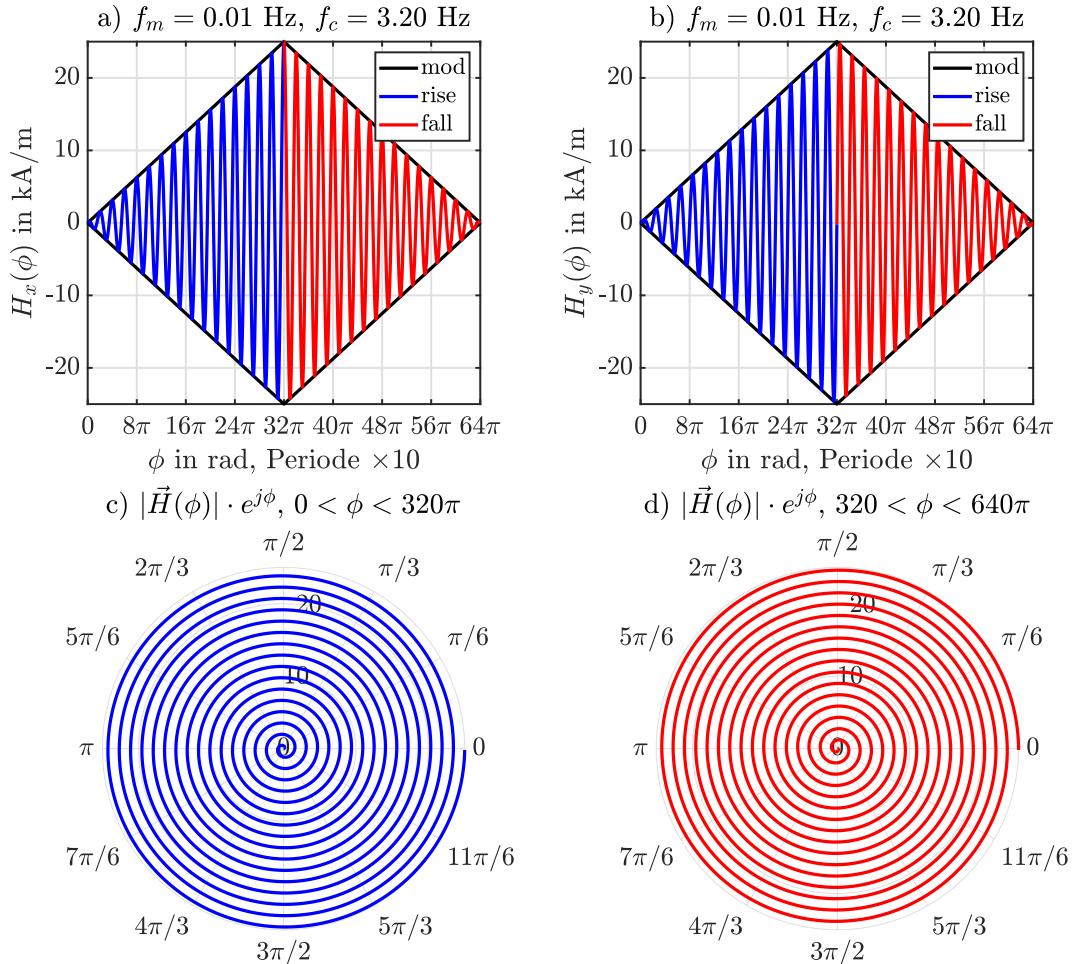


Abbildung 2.5: Magnetfeldstimulus zur Erzeugung von Sensorkennfeldern. Es sind die Bestandteile des magnetischen Sensorstimuli dargestellt, die zum Ausmessen des Sensorkennfeldes in  $H_x$ - und  $H_y$ -Richtung verwendet worden sind. Es ist das Prinzip des Verfahrens dargestellt. In a) und b) ist die 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  $f_m = 0,1$  Hz und einer Trägerwellenfrequenz  $f_c = 3,2$  Hz. Grafik nachempfunden aus [9].

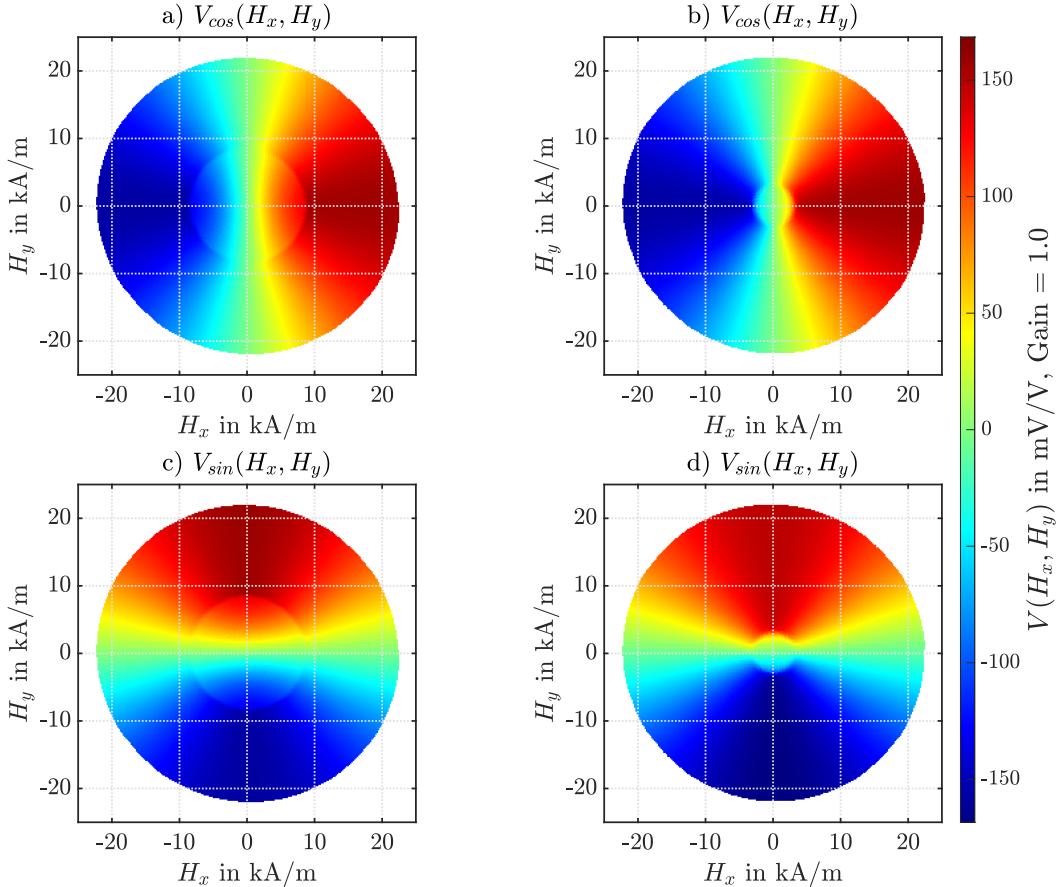


Abbildung 2.6: TDK TAS2141-AAAB Winkelsensorbrückenkennfelder. Zu sehen sind die Kennfelder der Cosinus-Brücke a) und b). Darunter befinden sich die Kennfelder der Sinus-Brücke c) und d). Die Kennfelder für beide Brücken a) und c) beziehen sich auf die steigenden Flanke der Amplitudenmodulation aus Abbildung 2.5 und die in b) bzw. d) gezeigten Kennfelder sind gewonnen aus der fallenden Flanke. Die Brückenkennfelder sind normiert in  $\text{mV V}^{-1}$ . 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  $-25 \text{ kA m}^{-1}$  bis  $25 \text{ kA m}^{-1}$ . Somit ergibt sich eine Bildauflösung für ein Kennfeld von  $256 \times 256$  Messpunkten. Grafik nachempfunden aus [9].

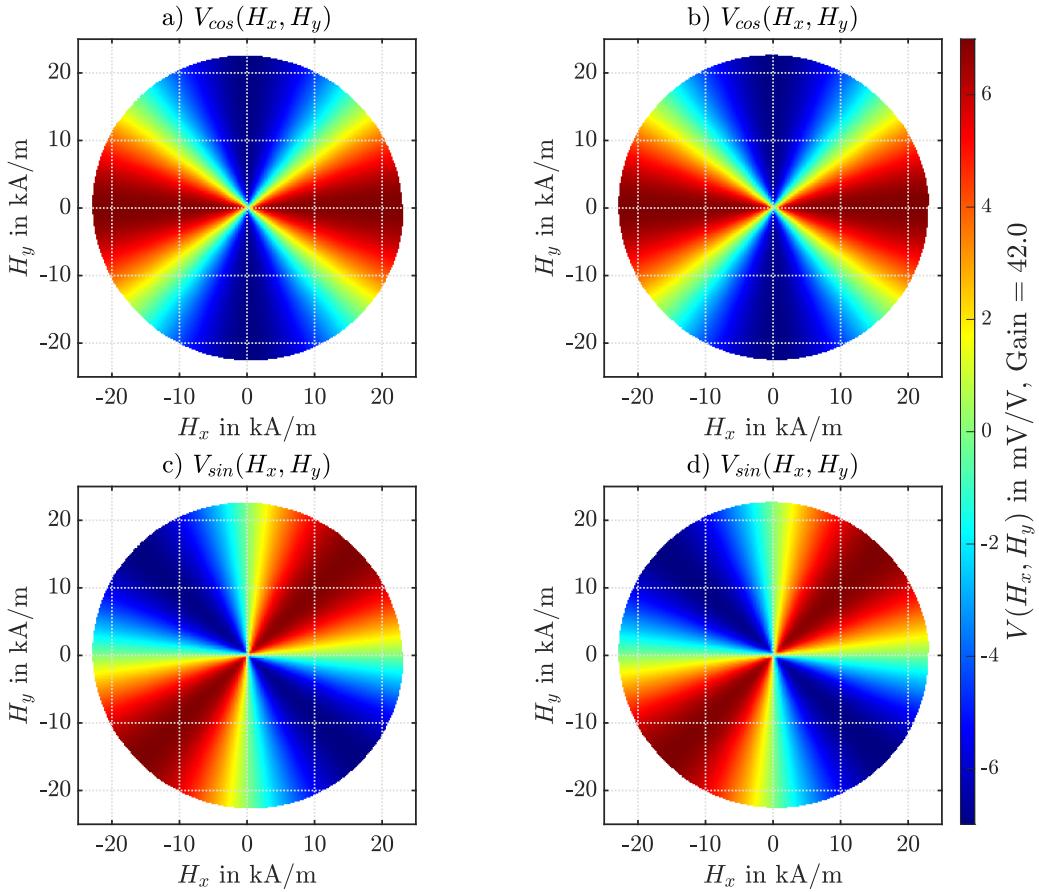


Abbildung 2.7: NXP KMZ60 Winkelsensorbrückenkennfelder. Zu sehen sind die Kennfelder der Cosinus-Brücke a) und b). Darunter befinden sich die Kennfelder der Sinus-Brücke c) und d). Die Kennfelder für beide Brücke a) und c) beziehen sich auf die steigenden Flanke der Amplitudenmodulation aus Abbildung 2.5 und die in b) bzw. d) gezeigten Kennfelder sind gewonnen aus der fallenden Flanke. Die Brückenkennfelder sind normiert in  $\text{mV V}^{-1}$ . 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  $-25 \text{ kA m}^{-1}$  bis  $25 \text{ kA m}^{-1}$ . Somit ergibt sich eine Bildauflösung für ein Kennfeld von  $256 \times 256$  Messpunkten. Grafik nachempfunden aus [9].

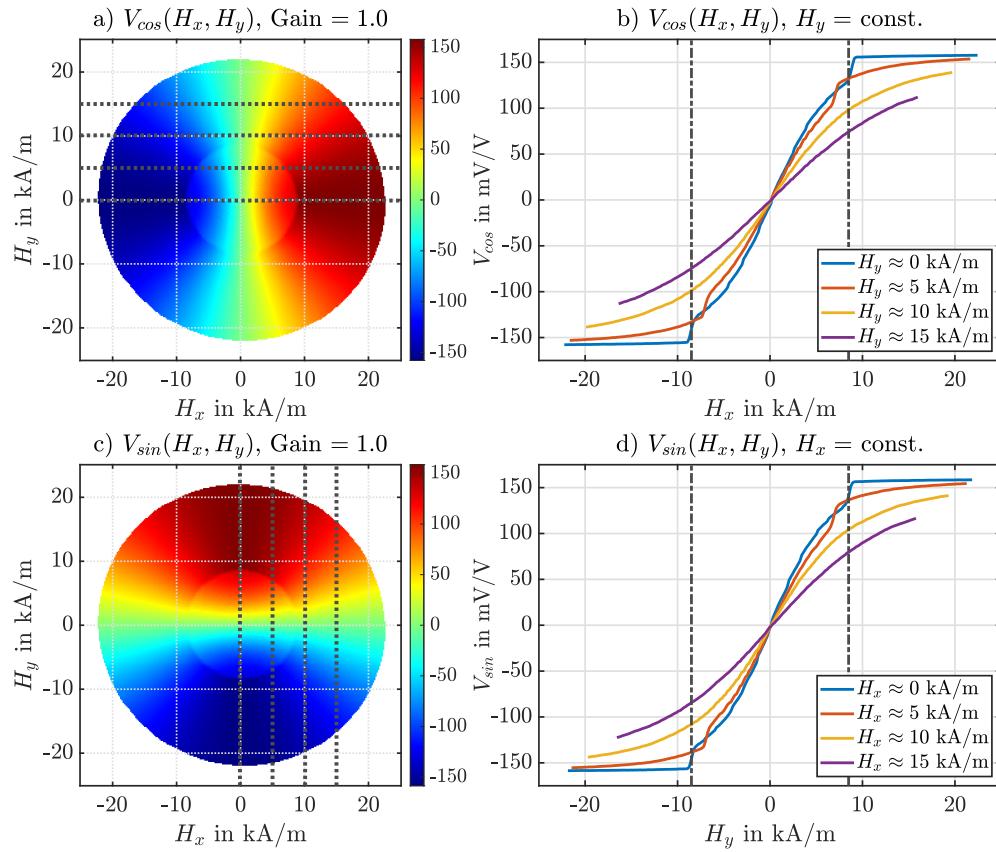


Abbildung 2.8: TDK TAS2141-AAAB Kennfeldquerschnitte. Für die Kennfelder gewonnen aus steigender Amplitudenmodulation a) und c). Es sind Querschnitte durch die jeweiligen Kennfelder in b) und d) abgebildet. Für  $V_{cos}$  a), b) verschiedene konstante  $H_y$  und  $V_{sin}$  c), d) entsprechend verschiedene konstante  $H_x$  Querschnitte. Grafik nachempfunden aus [9].

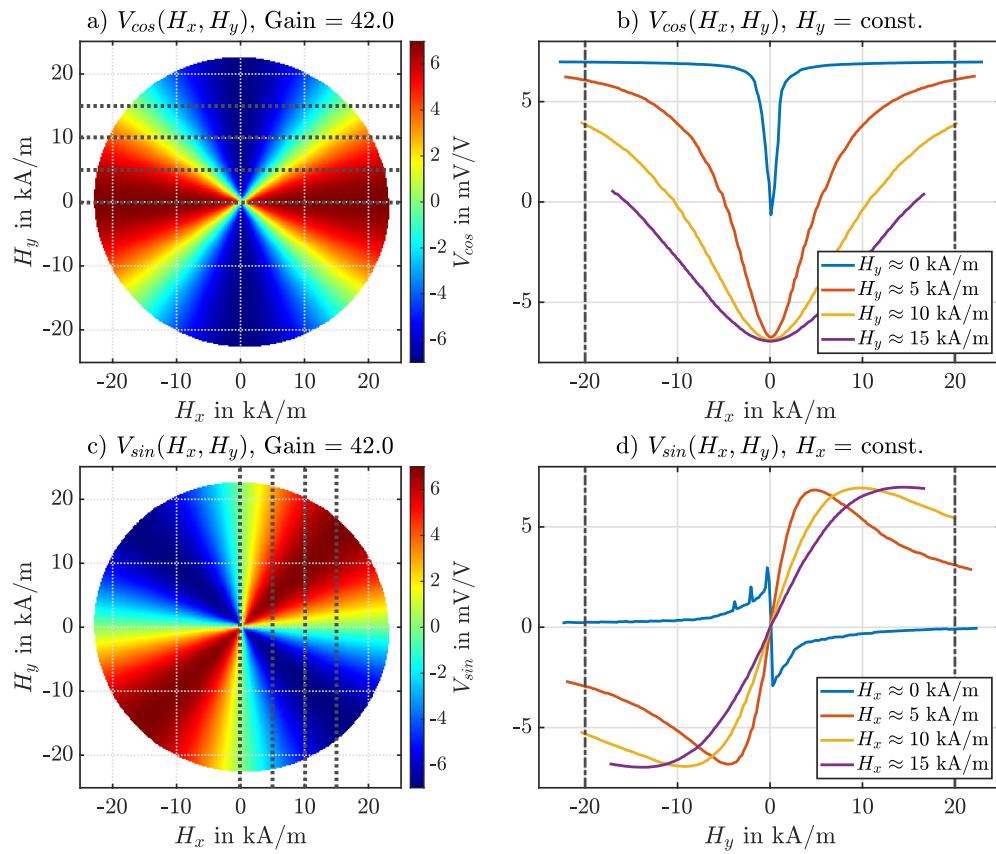


Abbildung 2.9: NXP KMZ60 Kennfeldquerschnitte. Für die Kennfelder gewonnen aus steigender Amplitudenmodulation a) und c). Es sind Querschnitte durch die jeweiligen Kennfelder in b) und d) abgebildet. Für  $V_{cos}$  a), b) verschiedene konstante  $H_y$  und  $V_{sin}$  c), d) entsprechend verschiedene konstante  $H_x$  Querschnitte. Grafik nachempfunden aus [9].

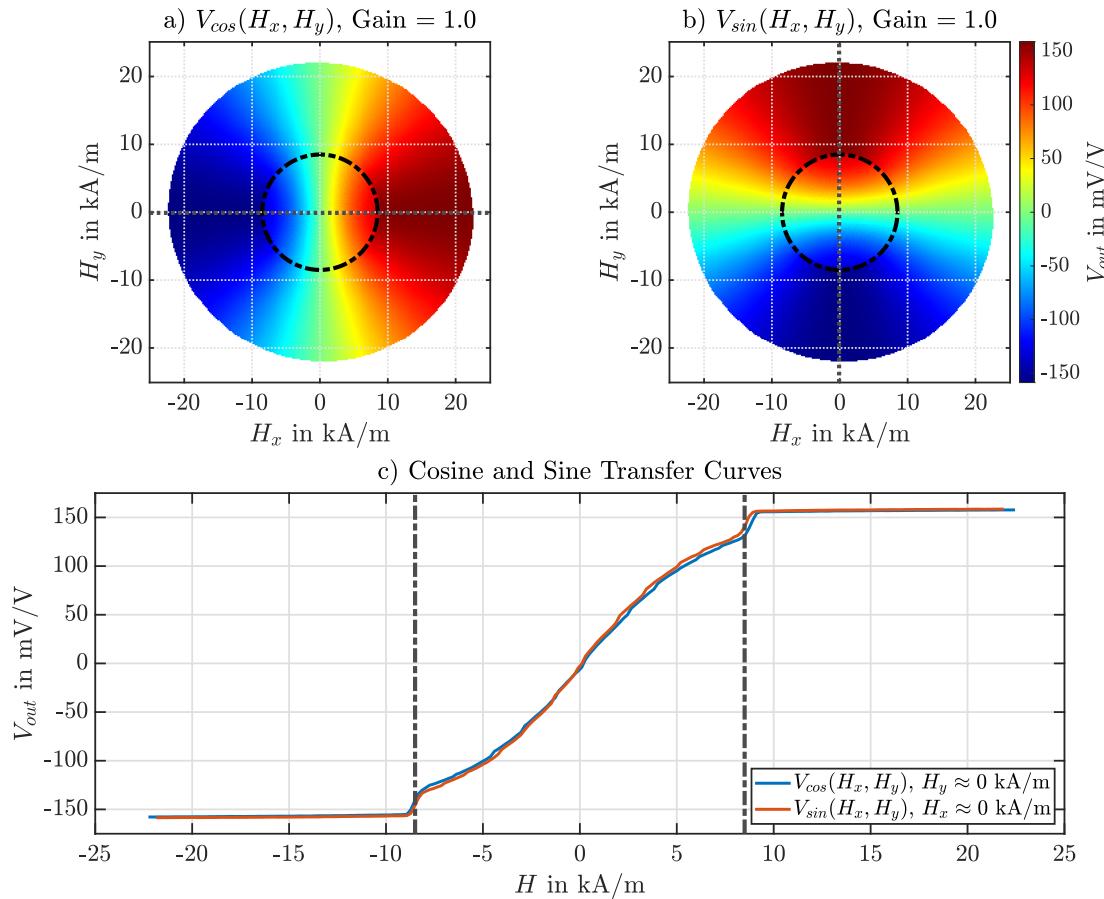


Abbildung 2.10: TDK TAS2141-AAAB Übertragungskennlinie. Es sind wieder die Kennfelder aus der steigenden Amplitudenmodulation in a) und b). In c) sind die Übertragungskennlinien für den Sensor gezeigt mit Kennzeichnung für den Betrieb auf dem linearen Plateau des Kennfeldes bei  $8.5 \text{ kA m}^{-1}$ . Ebenfalls zu sehen in a) und b) durch die sich ergebene Kreisbahn mit einem Radius des aufgelegten Intervalls aus c). Grafik nachempfunden aus [9].

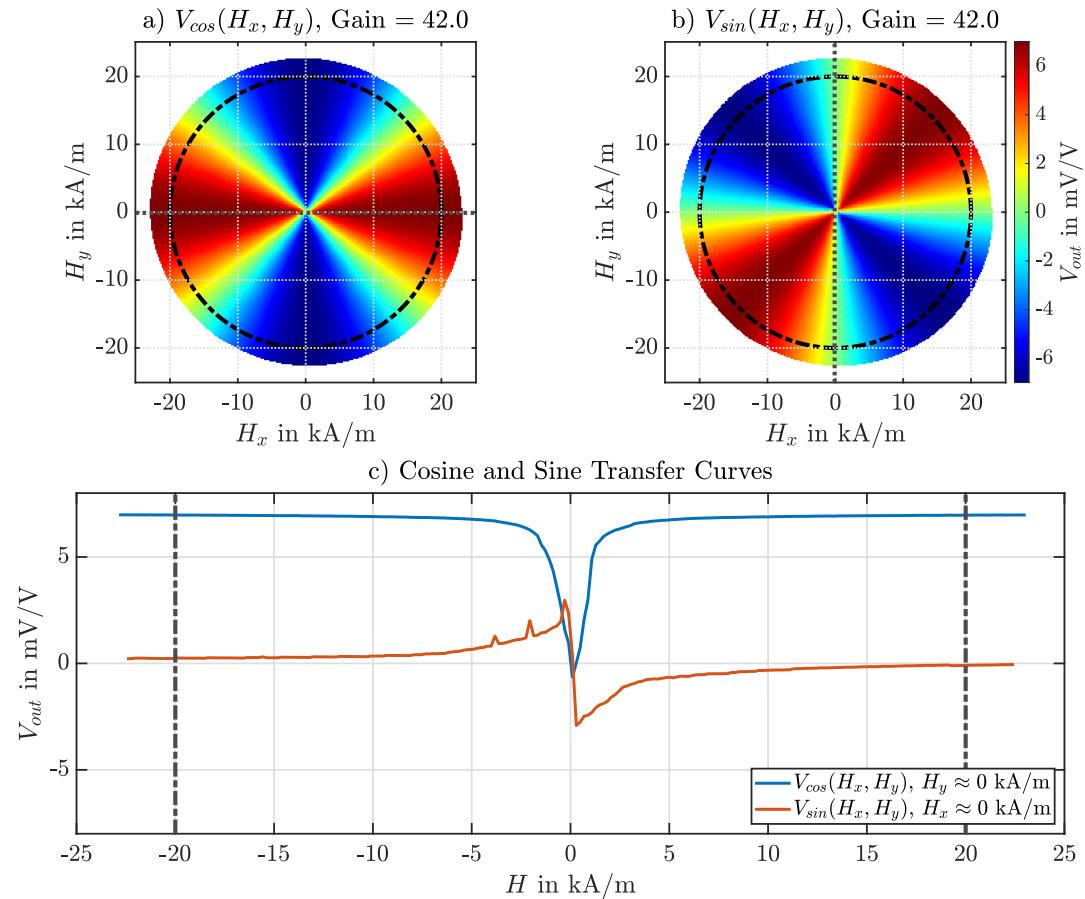


Abbildung 2.11: NXP KMZ60 Übertragungskennlinie. Es sind wieder die Kennfelder aus der steigenden Amplitudenmodulation in a) und b). In c) sind die Übertragungskennlinien für den Sensor gezeigt mit Kennzeichnung für den Betrieb in Sättigung bei  $20 \text{ kA m}^{-1}$ . Ebenfalls zu sehen in a) und b) durch die sich ergebene Kreisbahn mit einem Radius des aufgelegten Intervalls aus c). Grafik nachempfunden aus [9].

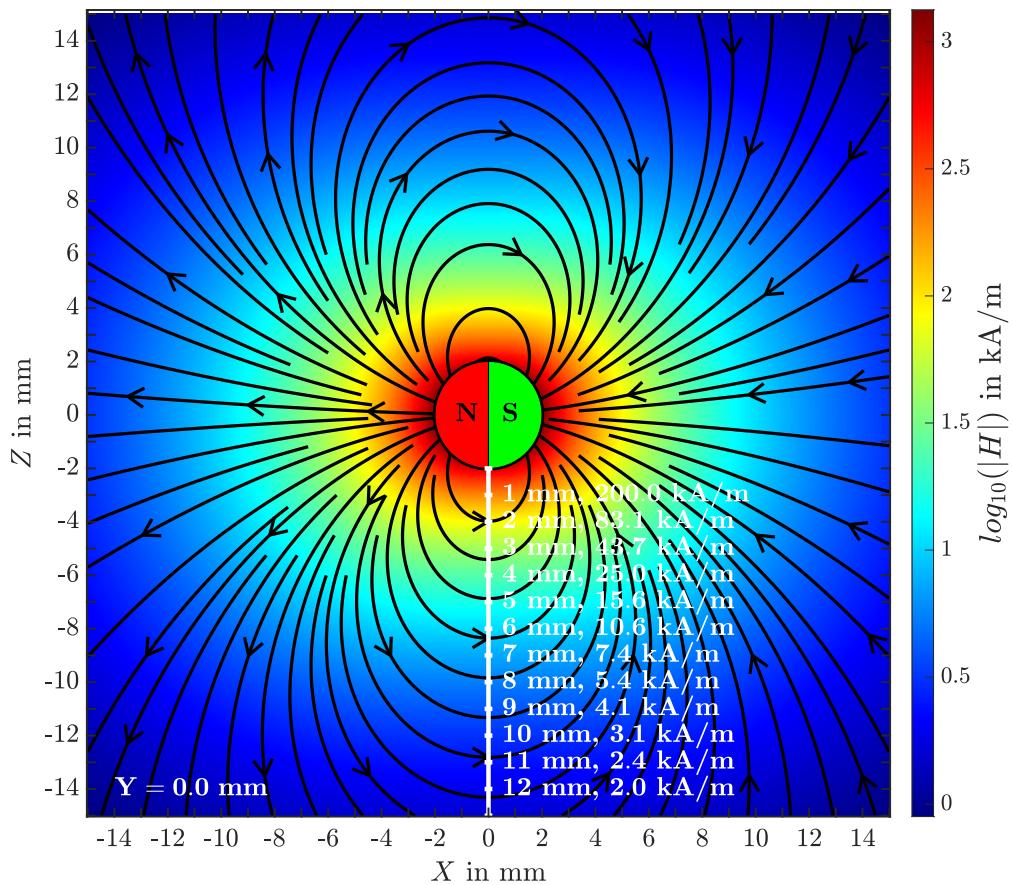


Abbildung 2.12: Approximierter Kugelmagnet. Die Approximation des Kugelmagneten erfolgt über Dipol-Feldgleichung in Näherung des Kugelmagnetfernfeldes. Das Magnetfeld ist auf  $200 \text{ kA m}^{-1}$  bei einem Abstand von 1 mm zur Kugelmagnetoberfläche normiert. Der Radius des Kugelmagneten beträgt 2 mm.

## 2.3 Prinzip des Sensor-Arrays

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

## 2.4 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)

## 2.5 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 . . . . .	5
1.3	Veranschaulichung eines vollständigen Sensor-ICs für die Drehwinkelerfassung . . . . .	6
2.1	Allg. Kreisdarstellung des euklidischen Winkelabstands . . . . .	10
2.2	Winkelrückrechnung mit Bereichsumschaltung . . . . .	11
2.3	Schichtmodelle dreier magnetoresistive Effekte . . . . .	13
2.4	TMR Drehwinkelapplikation . . . . .	13
2.5	Magnetfeldstimulus zur Erzeugung von Sensorkennfeldern . . . . .	15
2.6	TDK TAS2141-AAAB Winkelsensorbrückenkennfelder . . . . .	16
2.7	NXP KMZ60 Winkelsensorbrückenkennfelder . . . . .	17
2.8	TDK TAS2141-AAAB Kennfeldquerschnitte . . . . .	18
2.9	NXP KMZ60 Kennfeldquerschnitte . . . . .	19
2.10	TDK TAS2141-AAAB Übertragungskennlinie . . . . .	20
2.11	NXP KMZ60 Übertragungskennlinie . . . . .	21
2.12	Approximierter Kugelmagnet . . . . .	22

# **Tabellenverzeichnis**

A.1 Genutzte Software . . . . .	36
---------------------------------	----

# 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.

**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](http://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] T. Mehm. „Schaltungsentwurf und Mikrocontrollersteuerung für ein Tunnel-Magnetoresistives Sensor-Array“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2019.
- [9] 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.
- [10] 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.

## Literatur

---

- [11] J. Ernsting. „Funktionsdemonstrator fürmagnetische Sensor-Arrays aufBasis des MikrocomputersRaspberry PI“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2020.
- [12] T. Schütte u. a. „Positionserfassung mittels Sensor-Array aus Tunnel-Magnetoresistiven Vortex-Dots und lernender Signalverarbeitung“. In: *8. Fachtagung Sensoren im Automobil*. 2020.
- [13] T. Schütte u. a. „Positionserfassung mittels Sensor-Array ausTunnel-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](https://doi.org/10.1007/978-3-662-61260-6_14).

# 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 beigelegt. 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 [10] 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