

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

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Karl-Ragnar 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, Winkelvorschau

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 0.0.1 18.02.2021	2
1.2 Zielstellung 0.0.1 14.01.2021	3
2 Grundlagen 0.0.1 13.01.2021	4
2.1 Magnetische Sensorentypen und mechatronische Anwendung	4
2.2 Kennfeldmethode zur Modellierung der Sensoren	4
2.3 Prinzip des Sensor Arrays	4
2.4 Simulation über Dipol-Feldgleichung	5
2.5 Gauß-Prozess und Regressionsverfahren	5
3 Entwicklung von Software für die Optimierungs-Experimente 0.0.1 13.01.2021	6
3.1 Aufgabe der Software und grundsätzliche Funktion	6
3.2 Aufbau und Vorgehen	6
3.3 Sensor-Array-Simulation	7
3.4 Gauß-Prozess-Regression	7
4 Erprobungs- und Optimierungs-Experimente 0.0.1 13.01.2021	9
4.1 Festlegung des Startpunktes	9
4.2 Festlegung des Verfahrensweges ohne Verkipfung	10
4.3 Simulationsdurchführung	10
5 Auswertung 0.0.1 13.01.2021	11
5.1 Gegenüberstellung der GPR-Modelle	11
6 Zusammenfassung und Bewertung 0.0.1 13.01.2021	12
Abbildungsverzeichnis	13

Tabellenverzeichnis	14
Glossar	15
Abkürzungen	16
Literatur	17
 Anhang	 17
A Genutzte Software 0.0.3 08.01.2021	18
B Software-Dokumentation 0.0.4 13.01.2021	19
Selbstständigkeitserklärung	20

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 [6]. Die Arbeitsgruppe Sensorik an der HAW Hamburg erforscht moderne Ansätze der Signalverarbeitung für neugewonnene 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 mechanische Toleranzen zulassen [9].

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 Bewältigungen 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 Abbildung eines Tunnel-Magnetoresistance (TMR)-Sensormodells für die Drehwinkelerfassung.

1.1 Stand der Vorarbeiten 0.0.1 18.02.2021

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 [5][8] erbracht worden, die generelle Funktionalitäten und die technische Umsetzung eines magnetischen Sensor-Arrays im Maßstab 1 : 25 zeigen.

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 Sensorbänken angeordnet. Die Messwerterfassung erfolgt über ein Hyperplexing-Verfahren. Eine Steuerung des Hyperplexings und die weitere Messwertverarbeitung erfolgt mit Hilfe eines Mikrocontrollers.

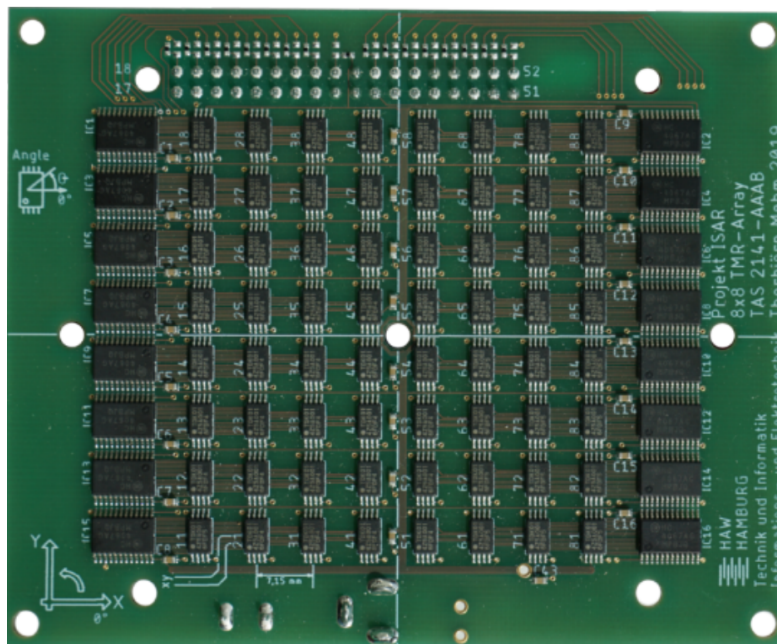


Abbildung 1.1: Platinen-Sensor-Array im Maßstab 1:25 aufgebaut als 8 × 8 Sensor-Array, dass als Aufsteckmodul für eine Mikrocontroller getriebene Signalverarbeitung bereitsteht [5].

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) [2] und TMR Sensoren der Firma TDK (TAS2141-AAAB) [3] verwirklicht worden. Das Maßstabsmodell des magnetischen Sensor-Arrays kann zu Vergleichs- und weiteren Erprobungsarbeiten genutzt werden, die z.B. Erkenntnisse aus Simulationen und oder Hardware-Optimierungsarbeiten einbinden.

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 [6] charakterisiert. Der so gewonnene Datensatz kann dann, durch geeignete Interpolationsverfahren, in einer Simulation zur Generierung eines magnetischen Sensor-Arrays genutzt werden.

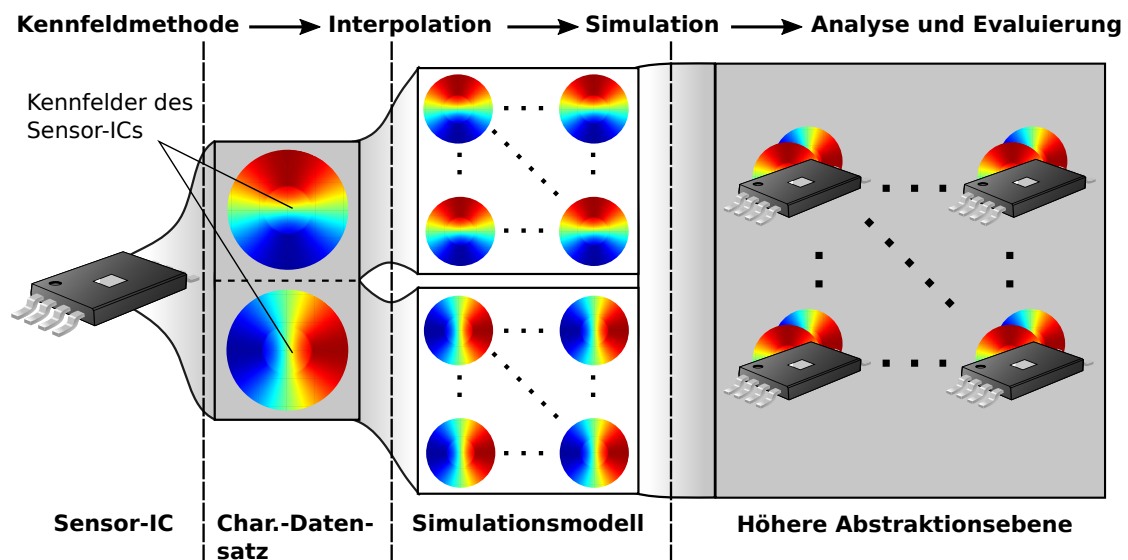


Abbildung 1.2: B

1.2 Zielstellung 0.0.1 14.01.2021

2 Grundlagen 0.0.1 13.01.2021

- Einleitung Aufgabenfeld

2.1 Magnetische Sensorentypen und mechatronische Anwendung

- Anwendungsfall Drehzahlmessung
- Anwendungsfall Winkelmessung
- Ausblick TMR und Strommessung
- Aufbau Sensorbrücke TMR (Umriss)

2.2 Kennfeldmethode zur Modellierung der Sensoren

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

2.3 Prinzip des Sensor Arrays

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

2.4 Simulation über Dipol-Feldgleichung

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

2.5 Gauß-Prozess und Regressionsverfahren

- Erläuterung des Regressionsverfahren im allg.
- Bedeutung der Kovarianzfunktion
- Möglichkeiten zur Mittelwertschätzung und -Korrektur
- Einbringen von Feature-Funktionen über die Mittelwertschätzung

3 Entwicklung von Software für die Optimierungs-Experimente 0.0.1 13.01.2021

3.1 Aufgabe der Software und grundsätzliche Funktion

- 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
- Einordnung der Vorarbeiten in Bezug auf Regressionsverfahren (Jünemann)
- Skriptbasierte Voruntersuchungen zu Findung des mathematischen Modells bzw. Kovarianzfunktion (Matlab-Standard-Modelle)
- Bezugherstellung Einheitskreis und Orthogonalität des Ausgangssystems
- Beschreibung des kombinierten Systems aus der Vorarbeit (Jünemann)
- Optimierung des einfachen kombinierten Systems ohne Mittelwertschätzung
- Optimierung des einfachen kombinierten Systems mit Mittelwertschätzung
- Optimierung des kombinierten System mit individueller Mittelwertschätzung
- Einbringen des Atan2-Feature-Funktion über die Mittelwertschätzung und vereinfachte Optimierung
- Darstellung der einzelnen Optimierungsverfahren und Aufzeigen der Unterschiede im vorgehen

- Bemessung des Aufwands und Genauigkeiten
- Beziffern und ermitteln von Hyperparameter für die vier Regressionsmöglichkeiten des kombinierten Systems
- Nutzung des Moduls für eingestellte Konfigurierung

4 Erprobungs- und Optimierungs-Experimente 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 Fahrweges ohne Verkippung

- Vorbetrachtung des Magnetfeldes
- 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 zu Speichernde Werte
- Arbeitsphase, Genauigkeit, Fehlererkennung, Stabilität

6 Zusammenfassung und Bewertung 0.0.1

13.01.2021

Abbildungsverzeichnis

1.1	Platinen-Sensor-Array Maßstab 1:25	2
1.2	A	3

Tabellenverzeichnis

A.1 Genutzte Software	18
---------------------------------	----

Glossar

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

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

CPU Prozessorkern.

HDD Festplattenlaufwerk.

IC Integrated-Circuit.

ISAR Integrated-Sensor-Array.

OS Betriebssystem.

RAM Arbeitsspeicher.

SW Software.

TMR Tunnel-Magnetoresistance.

Literatur

- [1] 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.
- [2] NXP Semiconductors. *KMZ60 Angle sensor with integrated amplifier*. Datenblatt, 2014.
- [3] TDK. *TMR Angle Sensor TAS2141-AAAB*. Datenblatt, 2016.
- [4] H. Pape. „Simulation und Auswertung von Permanentmagneten für manetoresistive Sensor-Arrays“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2017.
- [5] T. Mehm. „Schaltungsentwurf und Mikrocontrollersteuerung für ein Tunnel-Magnetoresistives Sensor-Array“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2019.
- [6] T. Schütthe, 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.
- [7] 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.
- [8] J. Ernsting. „Funktionsdemonstrator für magnetische Sensor-Arrays auf Basis des Mikrocomputers Raspberry Pi“. Bachelorarbeit HAW Hamburg, 2020.
- [9] T. Schütthe 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.

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 [1]. 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 [7] 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 selbständig 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