



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Markus Piorek

Hard- und Software eines Messplatzes zur
Harmonischenanalyse bei magnetischen Sensoren

Diplomarbeit eingereicht im Rahmen der Diplomprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
Studienrichtung Automatisierungstechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. Ing. Karl Ragmar Riemschneider
Zweitgutachter : Prof. Dr. rer. nat. Thomas Holzhüter

Abgegeben am 24.März 2011

Markus Piorek

Thema der Diplomarbeit

Hard- und Software eines Messplatzes zur Harmonischenanalyse bei magnetischen Sensoren

Stichworte

anisotroper magnetoresistiver Effekt, Klirrfaktor, Kreuzspulenfeld, Helmholtz-Spule, Harmonischen Analyse, TMCM-351, DMT65, QSH4218

Kurzzusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wurde ein Messplatz gebaut, mit welchem magnetische Winkelsensoren durch Harmonischen Analyse und andere Charakterisierungseigenschaften untersucht werden können. Es wurden verschiedene Positionierungsverfahren in einem magnetischen Feld untersucht und an der gefundenen Messposition wurden Winkelmessungen durchgeführt. Die aufgezeichneten Messdaten werden an einen PC geschickt und dort mittels Matlab weiter verarbeitet.

Markus Piorek

Title of the paper

Hard- and Software development of an measurement system in use for magnetic anglesensors

Keywords

THD-calculation, AMR-Effect, cross-coil-field, Helmholtz-Coil, harmonic estimation, TMCM-351, DMT65, QSH4218

Abstract

In this thesis a measurement-system for analyzing the occurrence measurement errors of magnetic anglesensors was developed. The analyzing methods are a harmonic analysis of the sensor signals and other characteristic methods. The sensor signals are send to a PC for a further use with Matlab.

Danksagung

Danken möchte ich Herrn Professor Karl Ragmar Riemschneider dafür, dass mir die Möglichkeit geboten wurde dieses interessante Thema zu bearbeiten. Weiter möchte ich Ihm für seine Betreuung und Unterstützung während meiner Diplomarbeit danken. Weiterer Dank gebührt Herrn Diplom-Ingenieur Martin Krey, für seine Anregungen und nützlichen Hinweise. Ein Dank auch an die Mitglieder des ESZ-ABS Teams, welche durch Ihre freundliche Art die langen Stunden im Labor sehr angenehm gestaltet haben.

Ein besonderer Dank geht an meine Mutter Regina und meine Schwester Marina, welche mich immer unterstützt haben und auch in schlechten Zeiten ein fester Halt in meinem Leben sind. Meiner Freundin Andrea möchte ich für Ihre Geduld mit mir danken und das Sie mir immer mit Rat und Tat zur Seite steht.

Meine Gedanken waren stets und werden es immer sein, bei meinem Vater Johann Piorek, welcher leider das Ende meines Studiums nicht mehr selber mit erleben darf.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
Bildverzeichnis	10
1. Ziel der Diplomarbeit	13
2. Spinmoment und Anisotroper Magnetoresistiver Effekt	16
2.1. Spinmoment	16
2.2. Weissche Bezirke	18
2.3. Der anisotrope magnetoresistive Effekt (AMR)	19
2.3.1. Widerstandsverhalten eines ferromagnetischen Streifens	19
2.3.2. Der spezifische Widerstand in x-Richtung	20
2.3.3. Der spezifische Widerstand in y-Richtung	22
2.3.4. Gesamtbetrachtung über das Widerstandsverhalten	22
2.3.5. Anmerkungen zum Verhalten im externen Feld	23
3. Winkelsensor	26
3.1. Messbrücken	26
3.1.1. Kosinus- und Sinus-Brücke	27
3.2. Winkelsensor KMA 199e	29
3.3. Winkelsensor KMZ 60 V1B	30
3.4. Ursachen für Winkelfehlmessungen	33
3.4.1. Geringe magnetische Feldstärke	33
3.4.2. Effekte auf Grund von Feldinhomogenitäten	34
3.4.3. Einfluß der Winkelsensorkomponenten	36
3.5. Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen	40
3.5.1. Aufgabenstellung	40
3.5.2. Durchführung und Ergebnisse	40
4. Kreuzspulenfeld	43
4.1. Grundprinzip der Helmholtz Spule	43
4.2. Aufbau der Kreuzspulenkästen	44
4.3. Das magnetische Feld im Kreuzspulenkasten	46

4.4. Inhomogenitäten im magnetischen Feld	50
5. Positionsbestimmung	52
5.1. Lissajous-Abgleich	52
5.2. Positionsbestimmung im rotierenden Feld	55
5.2.1. Erzeugung eines rotierenden magnetischen Feldes	59
5.3. Positionsbestimmung im statischen Feld	61
6. Winkelmessungen	63
6.1. Zielsetzung der Messungen	63
6.2. Bestimmung der Messgrößen	64
6.3. Durchführung/Messplan der Winkelmessung	65
7. Messaufbau	71
7.1. Hardware	71
7.1.1. Messgestell	71
7.1.2. Motorisierung der Achsen	73
7.2. Software	76
7.2.1. Hardwareansteuerung	77
7.2.2. Messdatenauswertung	78
8. Auswertung der Messdaten	83
8.1. Ergebnisse des elektrischen Drehens	83
8.1.1. Auswertung Winkelmessungen	83
8.1.2. Auswertung Offset	90
8.1.3. Auswertung k-Faktor	94
8.1.4. Auswertung Phasenverschiebung	96
8.2. Ergebnisse des mechanischen Drehens	99
8.2.1. Auswertung Winkelmessungen	100
8.2.2. Auswertung Offset	103
8.2.3. Auswertung k-Faktor	104
8.2.4. Auswertung Phasenverschiebung	105
8.3. Gesamtauswertung der Messdaten	106
9. Zusammenfassung	112
9.1. Lösungen und Ergebnisse	112
9.2. Offene Fragestellungen	116
9.3. Fazit	117
Literaturverzeichnis	118
A. Anhang	120

A.1. Bilder	120
A.1.1. Bilder zu Kapitel 4	120
A.1.2. Bilder zu Kapitel 5	122
A.1.3. Bilder zu Kapitel 7	124
A.2. Software	127

Tabellenverzeichnis

3.1. Parameter des KMZ60 [9]	33
4.1. Technische Daten der Kreuzspulenkästen	45
4.2. Schwankungen der Feldstärke in Abhängigkeit eines Radius um den Mittelpunkt	51
6.1. Beispiel eines durch Phasenverschiebung hervorgerufenen Winkelfehlers	65
7.1. Schrittweiten der Schrittmotoren QSH4218 zum Verfahren der X- und Y-Achse	74
7.2. Drehmesstisch DMT65 Schrittweiten pro Microstep Auflösung	74
7.3. Drehmesstisch DMT65 Winkelgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Microstep Einstellungen, bezogen auf die Geschwindigkeitseinstellung 1000	76
8.1. Messeinstellungen elektrisches Drehen	85
8.2. Messergebnisse Device 1 mit Angabe der höchsten Abweichung	87
8.3. Messergebnisse Device 2 mit Angabe der höchsten Abweichung	87
8.4. Durchschnittlicher Offset des Device 1 (links) und Device 2 (rechts) beim elektrischen Drehen	91
8.5. Maximale Phasenverschiebung und quadratisches Mittel der Messreihen von Device 1	96
8.6. Maximale Phasenverschiebung und quadratisches Mittel der Messreihen von Device 2	97
8.7. Messeinstellungen mechanisches Drehen	99
8.8. Device 1, Winkelmessungen mit Drehmesstisch DMT65 im Bereich zwischen 0,5° bis 5°	101
8.9. Device 2, Winkelmessungen mit Drehmesstisch DMT65 im Bereich zwischen 0,5° bis 5°	102
8.10. Device 1, Offset der Brückenausgangssignale	103
8.11. Device 2, Offset der Brückenausgangssignale	103
8.12. K-Faktor für Device 1 und 2. Dargestellt ist der RMS-Wert der Amplituden der Brückenausgangssignale.	104
8.13. Device 1, maximaler Wert und RMS-Mittelwert der Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen	105

8.14. Device 2, maximaler Wert und RMS-Mittelwert der Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen	105
8.15. Zusammenfassung der Messauswertung. Oben: elektrisches Drehen, unten: mechanisches Drehen	111
9.1. Tabelle der Faktoren, welche die Winkelmessung beeinflussen (\oplus positiv, 0 neutral, \ominus negativ)	115

Bildverzeichnis

2.1. Ferromagnetische Ausrichtung des Elektronenspins [12]	18
2.2. Komponenten des elektrischen Feldes in x-Richtung [12]	20
2.3. Komponenten des elektrischen Feldes in y-Richtung [12]	21
2.4. Easy Axis [1]	23
2.5. Stoner-Wohlfarth-Astroid [1]	25
3.1. Wheatstone Messbrücke	27
3.2. Aufbau der Wheatstone Messbrücken in einem Winkelsensor [12], links erwei- tert um eine Markierung der Kosinus- und Sinus-Messbrücke. Rechts ist eine Ansicht ohne Markierung zu sehen.	28
3.3. Ausgangssignale der Messbrücken im Winkelsensor [14]	28
3.4. Funktionsdiagramm KMZ60 mit Sensorbrücken [9]	31
3.5. Einbauposition der Messbrücken. Links: KMA199e [8], rechts: KMZ60 [9] . . .	32
3.6. Signalfehler auf Grund von geringer Feldstärke [15]	34
3.7. Form des Winkelfehlers hervorgerufen durch zu geringes Feld [15]	35
3.8. Winkelfehlerverlauf bedingt durch einen Offset [15]	37
3.9. Winkelfehler durch Einbauposition [9]	39
4.1. Schematische Spulenanordnung (a) und Feldlinienverlauf zwischen den Spu- len (b) [4]	44
4.2. Verteilung der magnetischen Feldstärke H auf den Spulenachsen	47
4.3. Ausschnitt aus dem Großfeldkasten, mit Feldlinienverlauf. Darstellung durch femm4.2	48
4.4. Messung der Feldstärke im Großfeldkasten. Farbe kodiert die magnetische Feldstärke in kA/m	49
4.5. Verlauf der magnetischen Feldstärke auf einem Radius von $r=3\text{mm}$ um den Achsenmittelpunkt	50
5.1. Lissajous-Figuren. Links ist eine Lissajous-Figur dargestellt wie man sie bei einem Frequenzverhältnis von 2:1 erwarten kann (das zu erwartende Verhält- nis von Sensorsignal zu Anregung Kreuzspulenkasten). Rechts ein Beispiel für Frequenzverhältnis von 3:1. [5]	53
5.2. Beispiel für die Konstruktion einer Lissajous-Figur [5]	54

5.3. Schematische Draufsicht auf den Großfeldkasten. Zu sehen ist die Bezeichnung der Achsen und wie bei der Bestimmung der Messposition verfahren wird.	57
5.4. Kosinus-Messbrücke (V_{out1}) Ergebnis einer Suche nach der Messposition mittels elektrischen Drehens. Zu erkennen ist die Trichterform des Klirrfaktors. Farblich codiert ist der dB-Wert des Klirrfaktors dargestellt.	58
5.5. Sinus-Messbrücke (V_{out2}) Ergebnis einer Suche nach der Messposition mittels elektrischen Drehens. Farblich codiert ist der dB-Wert des Klirrfaktors dargestellt.	59
5.6. Signalverlauf der Messbrücken an einer Position mit hohem Klirrfaktor-Wert.	60
5.7. Signalverlauf der Messbrücken an einer Position mit niedrigem Klirrfaktor-Wert.	60
5.8. Magnetisches Feld des X-Achsen Spulenpaares, aufgenommen mit dem KMZ60. Die Sensorspannungen wurden farblich kodiert.	62
6.1. Messaufbau in schematischer Ansicht	70
7.1. Messplatz inklusive Temperaturüberwachung. Zu sehen sind die Motoren der X- und Y-Achse, der Drehmesstisch, ein Kreuzspulenkasten und die Verkippungseinheit der Z-Achse mit Sensorstab	73
7.2. Schematische Darstellung der Ansteuerung der verschiedenen motorisierten Achsen und des Drehmesstisches mittels der Steuerungsplatine TMCM-351	75
7.3. Flussdiagramm von Messansteuerung.m	81
7.4. Flussdiagramm von Signalauswertung.m	82
8.1. Winkelmessung beim elektrischen Drehen, dargestellt durch eine Matlab Simulation. Mit eingezeichnet sind beispielhaft die Positionen, an denen Winkelmessungen vorgenommen sind.	84
8.2. Winkelmessung mittels elektrischem Drehens. Mit abgebildet ist die Spulenanregung (um Faktor 10 verkleinert) und die Positionen der Winkelmessungen.	86
8.3. Winkeldifferenz des 1. gemessenen Winkels bei Device 1	88
8.4. Winkeldifferenz des 2. gemessenen Winkels bei Device 1	88
8.5. Winkeldifferenz des 1. gemessenen Winkels bei Device 2	89
8.6. Winkeldifferenz des 2. gemessenen Winkels bei Device 2	89
8.7. Offsetdifferenz der Kosinusbrückenspannung V_{out1} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 1	92
8.8. Offsetdifferenz der Sinusbrückenspannung V_{out2} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 1	92
8.9. Offsetdifferenz der Kosinusbrückenspannung V_{out1} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 2	93
8.10. Offsetdifferenz der Sinusbrückenspannung V_{out2} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 2	93
8.11. Abweichung des k-Faktors, gemessen an Device 1	95

8.12. Abweichung des k-Faktors, gemessen an Device 2	95
8.13. Abweichung der Phasenverschiebung, gemessen an Device 1	97
8.14. Abweichung der Phasenverschiebung, gemessen an Device 2	98
8.15. Abweichung der Sensorposition von der Messposition. Dargestellt mit einem Winkelsensor über einem Dauermagneten [11].	110
A.1. Dargestellt ist die Verteilung des magnetischen Feldes im simulierten Kreuzfeldkasten. Farblich codiert ist die magnetische Feldstärke dargestellt.	120
A.2. Hier ist die Feldlinienverteilung im Kreuzfeldkasten simuliert. Die Spulen einer Achse sind parallel geschaltet, wie es auch bei Messungen mit dem Winkelsensor erfolgte.	121
A.3. Messergebnis einer Messreihe zur Positionsbestimmung mit zwei Minima. Farblich kodiert wurde der Klirrfaktor in Prozent. Ein solches Messergebnis resultiert aus einer Verkippung des Sensors. Zu sehen ist in dem Bild die Klirrfaktoren der Kosinus-Messbrücke. Deutlich ist in der Mitte des Messbereiches ein Doppeltrichter zu erkennen.	122
A.4. Messergebnis einer Messreihe zur Positionsbestimmung mit zwei Minima. Farblich kodiert wurde der Klirrfaktor in Prozent. Ein solches Messergebnis resultiert aus einer Verkippung des Sensors. Zu sehen ist in dem Bild die Klirrfaktoren der Sinus-Messbrücke.	123
A.5. Innenansicht des 19 Zoll Gehäuses. Zu sehen ist die Steuerplatine TMCM-351, eine 24 V Spannungsversorgung (links oben) für die Steuerungsplatine und eine 12 V Spannungsversorgung (oben rechts) für die Kühlung der Kreuzspulenkästen.	124
A.6. Auf diesem Bild sind die Motoren QSH4218 des Koordinatentisches zum Verfahren in X- und Y- Richtung.	125
A.7. Hier ist die Position des Drehmesstisches DMT65 zu erkennen. Platziert ist dieser auf dem Koordinatentisch. Darüber ist ein Kreuzspulenkasten erkennbar.	125
A.8. Zu sehen ist auf diesem Bild die Verkippungseinrichtung der Z-Achse. An dieser Verkippungseinrichtung ist direkt der Sensorstab mit dem Winkelsensor KMZ60 angebracht.	126
A.9. In diesem Bild ist der ZIF-Socket mit eingesetzten KMZ60 zu sehen. Der ZIF-Socket ist an der Spitze des Sensorstabs angebracht.	126

1. Ziel der Diplomarbeit

Bereits jetzt sind moderne Kraftstoffeinspritzungen in Verbrennungsmotoren ohne die Kenntnis des genauen Verhältnisses zwischen dem Luft-Brennstoffgemisch nicht mehr realisierbar. Dieses Gemisch wird durch die Zufuhr von mehr oder weniger Luft energiereicher oder ärmer. Die Luftzufuhr erfolgt über eine Drosselklappe, welche den Luftstrom regelt. Zur Regelung des Luftstromes ist es notwendig, die genaue Öffnung der Drosselklappe und somit den Winkel der Drosselklappe zu kennen. Die Erfassung dieses Winkels erfolgt durch Winkelsensoren. Eine Art der Winkelsensortechnologie stellen Sensoren dar, die auf dem AMR-Effekt¹ basieren. Solche Winkelsensoren kommen nicht nur im Motorraum eines Fahrzeuges zum Einsatz, sondern überall dort wo ebenfalls Winkel erfasst und ausgewertet werden. Ein weiteres Fahrzeugelement in dem eine Winkelmessung erfolgt, ist das elektrische Gaspedal. Da es sich bei dem Winkelsensor um ein elektronisches Bauteil handelt, welches hohen Ansprüchen genügen muss, ist es notwendig die Anwendbarkeit solcher Massenprodukte regelmäßigen Kontrollen zu unterziehen.

Bereits jetzt ist die Anwendbarkeit der Winkelsensoren, welche auf den AMR-Effekt basieren, unbestritten. Es fehlt bis jetzt nur an den nötigen Messsystemen, um die spezifizierten Arbeitspunkte des Winkelsensors auch messtechnisch nachweisen zu können. Dieses Ziel soll sich im besten Fall darin zeigen, dass der hier entwickelte Messplatz die Vorgaben des Herstellers, in Bezug auf die Präzision der Winkelmessung, auf weniger als einen Prozent nachweisen kann. Bei der Herstellerfirma des hier untersuchten Winkelsensors wird versucht, diesem Ziel durch eine ideale Helmholtz-Spulenordnung gerecht zu werden. Jedoch werden bei einer idealen Helmholtz-Anordnung nur geringe magnetische Feldstärken erreicht. Der Ansatz der Konzeption des Messplatzes in dieser Diplomarbeit, versucht dieses Ziel über eine modifizierte Helmholtz-Spulenordnung zu erreichen. Da hier aber zwei Helmholtz-Spulenpaare eingesetzt werden, welche gekreuzt verbaut wurden, ist man der Erhöhung der magnetischen Feldstärke auf diese Art einen guten Schritt näher gekommen.

Der Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit liegt in der Entwicklung eines Messplatz zur Harmonischen Analyse der Sensorsignale von Winkelsensoren. Mittels des Messplatzes soll es ermöglicht werden, Winkelsensoren auf ihre Spezifikationen hin zu überprüfen.

¹ anisotropen magnetoresistiven Effekt

Hauptsächlich handelt es sich hierbei um mögliche Winkelfehlmessungen des Sensors. Um diese Anforderung erfüllen zu können, muss der entwickelte Messplatz in der Lage sein, bestimmte Messpositionen präzise anzufahren, vorgegebene Winkel zu durchfahren und die gesammelten Daten über eine Schnittstelle an ein weiter verarbeitendes Programm zu schicken. Als Programm zum Ansteuern des Messplatzes und zur Analyse der Messdaten wurde Matlab gewählt. Die magnetischen Felder werden mittels Kreuzspulenkasten erzeugt. Der Kreuzspulenkasten beruht auf dem Prinzip der Helmholtz-Spule. Die nötigen Maßnahmen zur Automatisierung der Messungen und die Erstellung der nötigen Messprotokolle auf Matlab-Basis sind ebenfalls Inhalt dieser Diplomarbeit. Die Beurteilung der Winkelmessungen soll mittels einer Harmonischen Analyse erfolgen. Bei einer Harmonischen Analyse werden die Sensorausgangssignale einer diskreten Fourier Transformation² unterzogen, um mittels einer Klirrfaktorberechnung eine Aussage über die Messposition innerhalb eines magnetischen Feldes zu treffen, und mögliche Winkelfehlmessungen zu erklären.

Temperatureinflüsse werden in dieser Diplomarbeit nicht berücksichtigt, da keine geeigneten Geräte, z.B. eine Temperaturkammer, zur Verfügung standen.

Die Themengebiete der vorliegenden Diplomarbeit umfassen sowohl die Theorie des AMR-Effekts [1] angefangen bei dem quantenphysikalischen Ursprung [2], bis zur Widerstandsänderung der Messbrücken des Winkelsensors durch ein externes magnetisches Feld [13]. Weitere Grundlagen fließen bei der Betrachtung der magnetischen Felder ein [7]. Die verwendeten magnetischen Felder für die Winkelmessung werden von einem Kreuzspulenkasten generiert. Ein Kreuzspulenkasten besteht aus 4 Spulen in Kreuz-Anordnung. Das Spulenpaar einer Achse bildet dabei annähernd ein Helmholtz-Spulenpaar. Um den Winkelsensor in die beste Messposition zu bringen, wurde ein motorisierter Koordinatentisch eingebaut. Ein freies Drehen um die Z-Achse ist ebenfalls möglich. Dies wird mittels eines motorisierten Drehmesstisches realisiert, welcher auch für das Anfahren bestimmter Winkelpositionen verwendet wird. Anhand dieser Winkelpositionen soll herausgefunden werden, ob der Messplatz den Anforderungen zur Analyse von Winkelsensoren genügt und die Winkelsensoren gegebenenfalls in der Lage sind, unter Laborbedingungen die erforderlichen Parameter des Herstellers NXP [9] zu erreichen. Die Analyse der Ausgangssignale des Winkelsensors erfolgt mittels einer DFT. Durch die Ermittlung der Harmonischen Anteile des Sensorsignals und anderer Messgrößen, welche aus dem Ausgangssignal des Winkelsensors gewonnen werden können, kann eine Aussage über die Qualität der Winkelmessungen vorgenommen werden.

Das analysierte Datenmaterial für diese Diplomarbeit stammt aus Messreihen, welche

²Abgekürzt DFT

allesamt mit dem konzipierten Messplatz aufgezeichnet wurden. Die Daten wurden anschließend in Matlab ausgewertet. Die dafür erforderlichen Programme wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit selbst erstellt. Um den Messplatz betreiben zu können, benötigt man Treiber zur Ansteuerung der Motoren und der Messgeräte. Weiterhin werden Programme zur Messdurchführung und zur anschließenden Analyse der Messdaten benötigt.

Die vorliegende Diplomarbeit gliedert sich in die Teile Grundlagen, Aufbau des Messplatzes, Messungen und Auswertung. Im Grundlagenteil wird der Ursprung und die Wirkung des anisotropen magnetoresistiven Effekts erklärt. Des Weiteren wird der Aufbau von Winkelsensoren und der Aufbau des Messplatzes mit seinen Komponenten erklärt. Im Abschnitt Messungen werden die einzelnen Messungen beschrieben und deren Durchführungen erläutert. Im abschliessenden Abschnitt über die Messdaten werden die zuvor durchgeführten Messungen ausgewertet. Eine Aussage über den entwickelten Messplatzes wird im Schlussteil getroffen.

2. Spinmoment und Anisotroper Magnetoresistiver Effekt

In diesem Kapitel sollen zuerst die Grundlagen für den anisotropen magnetoresistiven Effekt¹ herausgearbeitet werden. Da der AMR-Effekt eine direkte Auswirkung des Spinmoments und den daraus resultierenden magnetischen Eigenschaften ist, wird im Folgenden zunächst kurz erläutert, was unter einem Spinmoment von Elektronen zu verstehen ist. Die Betrachtung der Elektronen ist aus dem Grunde wichtig, da ferromagnetische Metalle freie Valenzelektronen besitzen, mit denen sie Bindungen zu anderen Stoffen eingehen können [2]. Des Weiteren gehört zu den Grundlagen des AMR-Effekts auch die magnetische Ausrichtung einzelner Domänen innerhalb eines magnetischen Materials, sogenannte Weissche Bezirke [20]. Auch darüber soll in diesem Kapitel ein kurzer Überblick gegeben werden. Im Anschluss beschäftigt sich die Arbeit mit dem AMR-Effekt, welcher in seiner Eigenschaft als widerstandsverändernde Ursache genauer beschrieben werden soll. Die theoretischen Grundlagen kommen aus bereits vorhandenen Vorarbeiten Dibbern [1] und Schörmer [13]. In diesen Arbeiten wird sich intensiv mit der Veränderung des Widerstandsverhalten, hervorgerufen durch den AMR-Effekt, auseinander gesetzt. Dieses wird in eine Gesamtbetrachtung des Widerstandsverhaltens in externen magnetischen Feldern einbezogen.

2.1. Spinmoment

Aus der Elektrodynamik [2] ist bekannt, dass ein Elektron auf seiner Bahn ein magnetisches Dipolmoment erzeugt.

$$\mu = I \cdot A [Am^2] \quad (2.1)$$

Wobei I der Strom ist, den ein Elektron mit der Ladung $q = -e$ auf seiner Bahn (Kreisbahn) mit einer Geschwindigkeit v , bei definierter Umlaufzeit $T = 2 \cdot \pi / \omega$ erzeugt. A ist die Fläche, welche von der Kreisbahn des Elektrons umschlossen wird. Zusammen mit dem

¹kurz auch AMR-Effekt genannt

Bahndrehimpuls l und der Ruhemasse eines Elektrons m_0 ergibt sich eine direkte Beziehung zwischen magnetischen Moment und Bahndrehimpuls.

$$\mu = -\frac{e}{2 \cdot m_0} \cdot l \quad (2.2)$$

Als Einheit dieses magnetischen Moments steht das Bohrsche Magneton μ_B .

$$\mu_B = \frac{e}{2 \cdot m_0} \cdot \hbar \cdot \pi = 9,274078 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 \quad (2.3)$$

Dieses passiert über ein Elektron mit dem Drehimpuls $|l| = \hbar \cdot \pi$. Auch als die Hälfte des Plankschen Wirkungsquantum, h -quer, bezeichnet ($h = \text{Plank'sches Wirkungsquantum mit } h = 4,13566733 \cdot 10^{-15} \frac{\text{eV}}{\text{T}}$).

Daraus resultiert der sogenannte g -Faktor. Der g -Faktor misst das Verhältnis von magnetischem Moment (in Bezug auf das Bohrsche Magneton) zum Drehimpuls (in der Größenordnung des halben Plankschen Wirkungsquantum \hbar). Hieraus resultiert ein magnetisches Moment des Bahndrehimpulses μ_l .

$$\mu_l = -g_l \cdot \mu_B \cdot \frac{l}{\hbar} \quad (2.4)$$

Zusätzlich zum magnetischen Moment des Bahndrehimpulses μ_l gibt es ein magnetisches Moment des Elektrons durch den Eigendrehimpuls (Spin s).

$$\mu_s = -g_s \cdot \frac{e}{2 \cdot m_0} \cdot s \quad (2.5)$$

s ist die Spinquantenzahl, welche die Werte 0,5; 1; 1,5; etc. annehmen kann. Die Spinquantenzahl hängt von den Valenzelektronen eines Stoffes ab. Ein Werkstoff mit beispielsweise 3 Valenzelektronen hat die Spinquantenzahl 1,5. Dieses kommt daher, dass jedes Elektron ein Spin von $\pm 1/2$ besitzt. Diese Spinquantenzahl gibt die Orientierung des Spins eines Elektrons an, indem sie positive oder negative Werte annimmt.

Der Spin kann seine Orientierung in Abhängigkeit zu einem äußeren magnetischen Feldes B ändern. Die zwei diskreten Orientierungen sind in diesem Fall parallel oder antiparallel zum Feld B . Aus dieser Orientierung kann man eine Auswirkung auf das elektrische Widerstandsverhalten eines ferromagnetischen Stoffes machen. Eine genauere Beschreibung wird im Kapitel 2.3 gegeben.

Als Werkstoffe mit ferromagnetischem Verhalten bezeichnet man Stoffe, deren freie Spinmomente sich ohne äußeres Feld B in größere Bezirke orientieren. Bei diesen Bezirken spricht man von Weisschen Bezirken. Ein Stoff hat freie Spinmomente wenn er paramagnetisch ist. Das bedeutet, ein paramagnetischer Werkstoff besitzt unpaarig besetzte Elektronenniveaus.

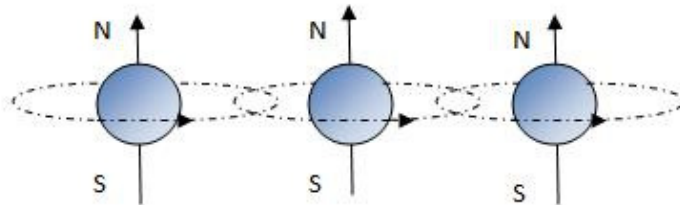


Bild 2.1.: Ferromagnetische Ausrichtung des Elektronenspins [12]

Als Ursache des Paramagnetismus gilt die Existenz des Eigendrehimpuls (Spin s). μ_l und μ_s stehen in Wechselwirkung zueinander. Auch diese beiden magnetischen Momente sind entweder parallel oder antiparallel zueinander. Beide Konfigurationen haben unterschiedliche Bindungsenergien zur Folge.

2.2. Weissche Bezirke

Ein ferromagnetischer Werkstoff besteht aus einer Vielzahl Weisscher Bezirke [20]. Was ein ferromagnetischer Stoff ist, wurde im vorherigen Abschnitt erläutert. Weissche Bezirke sind Domänen innerhalb eines Stoffes, in denen die Atome die gleiche magnetische Ausrichtung aufweisen. Getrennt sind solche Domänen durch sogenannte BLOCH-Wände. Das Herausbilden solcher Bezirke unterschiedlicher Orientierung erfolgt, indem es ein Bestreben innerhalb des ferromagnetischen Werkstoffs gibt, einen geschlossenen magnetischen Kreis für die Elementarenergie zu bilden. Weissche Bezirke lassen sich durch ein starkes, äußeres Magnetfeld immer in die Richtung des äußeren Feldes bringen. Dieses kann so weit gehen, bis aus mehreren kleinen Bezirken ein einziger Bezirk geworden ist, welcher die Orientierung des von außen angelegten Feldes hat.

2.3. Der anisotrope magnetoresistive Effekt (AMR)

In diesem Abschnitt soll das Widerstandsverhalten eines ferromagnetischen Streifens näher betrachtet werden. Diese Betrachtung ist wichtig, da der Winkelsensor aus solchen Widerstandsstreifen aufgebaut ist. Daher soll hier die Beziehung zwischen externen magnetischen Feldern und dem Widerstandsverhalten aufgezeigt werden. Dieses Widerstandsverhalten wird AMR-Effekt genannt.

2.3.1. Widerstandsverhalten eines ferromagnetischen Streifens

Der AMR-Effekt beschreibt die Eigenschaft der spezifischen Widerstandsänderung in Abhängigkeit zwischen interner Magnetisierung und Stromflußrichtung [1]. Besonders anschaulich lässt sich dieses Phänomen anhand eines homogenen, ferromagnetischen Streifens (Permalloy²) erläutern.

Liegt über dem Permalloy-Streifen eine konstante Spannung an, hat diese Spannung innerhalb des Permalloy-Streifens ein elektrisches Strömungsfeld E zur Folge, welches in eine Komponente in x-Richtung und eine in y-Richtung aufgespalten werden kann. Siehe hierzu auch die Abbildungen (2.2) und (2.3).

Das elektrische Strömungsfeld ist abhängig von der angelegten Spannung U und der Länge l des Permalloy-Streifens. Dieses Strömungsfeld hat einen Strom I zur Folge. Der Strom I bildet einen Winkel θ mit der internen Magnetisierung M_s . Solange kein externes Magnetfeld $H_{y,ext}$ existiert, ist der Winkel θ gering. Die Größe von θ ist sogar so gering, dass es nur einen Anteil in x-Richtung (der Stromrichtung) vom elektrischen Strömungsfeld gibt. Wird das externe Magnetfeld $H_{y,ext}$ größer, wird analog dazu auch der Winkel θ größer. Damit steigt auch der Anteil des elektrischen Strömungsfeldes in y-Richtung E_y [1],[13].

Die Widerstandsänderung lässt sich also in zwei verschiedene Komponenten aufteilen. Einmal in den Anteil in x-Richtung und den Anteil in y-Richtung. Dieses Aufteilen ist nützlich um den spezifischen Widerstand als Funktion des Winkels θ darzustellen.

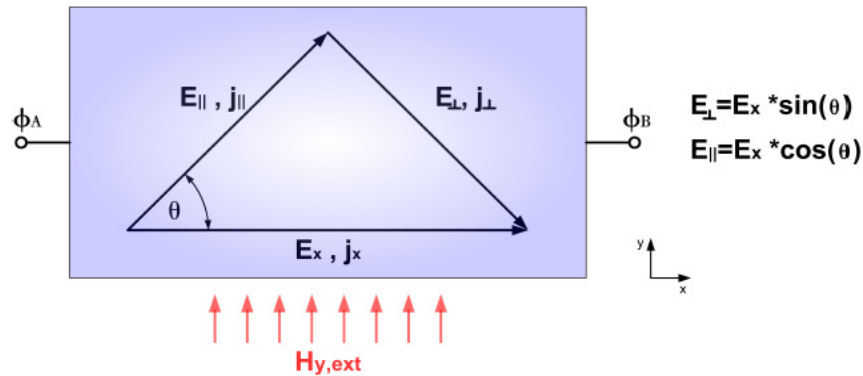


Bild 2.2.: Komponenten des elektrischen Feldes in x-Richtung [12]

2.3.2. Der spezifische Widerstand in x-Richtung

Bild (2.2) zeigt die Komponenten des elektrischen Strömungsfeldes in x-Richtung. Es setzt sich aus parallelen ($E_{\parallel}, j_{\parallel}$) und senkrechten (E_{\perp}, j_{\perp}) Anteilen zusammen. Zusammen mit dem Winkel θ setzt sich das elektrische Strömungsfeld wie folgt zusammen:

$$E_x = E_{\parallel} \cdot \cos(\theta) + E_{\perp} \cdot \sin(\theta) \quad (2.6)$$

Wenn man für die Anteile E_{\parallel} und E_{\perp} ihre Herleitung schreibt, welche sich aus der Definition des elektrischen Feldes, der Integration des Stromes über die Fläche des Permalloy-Streifens und dem Widerstand des ferromagnetischen Streifens ergibt, ändert sich die Formel (2.6) in die Formel (2.7). Mit der Definition für das elektrische Feld:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{I \cdot R}{d} = \frac{j \cdot A \cdot \rho \cdot d}{d \cdot A} = j \cdot \rho \quad (2.7)$$

folgt durch einsetzen in Formel (2.6)

$$\begin{aligned} E_x &= E_{\parallel} \cdot \cos(\theta) + E_{\perp} \cdot \sin(\theta) \\ &= \rho_{\parallel} \cdot j_{\parallel} \cdot \cos(\theta) + \rho_{\perp} \cdot j_{\perp} \cdot \sin(\theta) \\ &= j_x \cdot (\rho_{\parallel} \cdot \cos^2(\theta) + \rho_{\perp} \cdot \sin^2(\theta)) \\ &= j_x \cdot (\rho_{\parallel} \cdot \cos^2(\theta) + \rho_{\perp} - \rho_{\perp} \cdot \cos^2(\theta)) \\ &= j_x \cdot \rho_{\perp} \cdot \left(1 + \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} \cdot \cos^2(\theta) \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

²Nickel-Eisen Legierung hoher magnetischer Leitfähigkeit

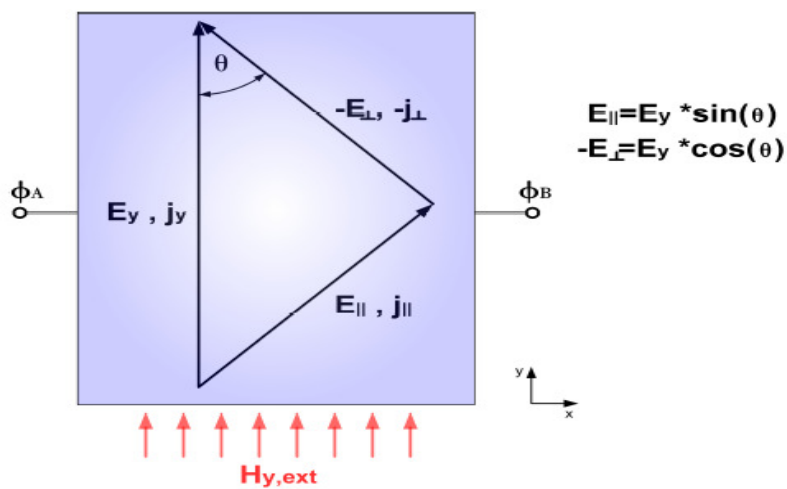


Bild 2.3.: Komponenten des elektrischen Feldes in y-Richtung [12]

Mit der Vereinfachung,

$$\frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\rho_{\perp}} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2.9)$$

welche die relative Größenänderung des AMR-Effekts prozentual wiedergibt. $\Delta\rho$ ist hierbei die durch ein externes magnetisches Feld hervorgerufene Widerstandsänderung im ferromagnetischen Streifen.

Zusammen mit dem Spannungsabfall über den Permalloy-Streifen ergibt sich zusammen mit Gleichung (2.9):

$$U_x = l \cdot j_x \cdot \rho_{\perp} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \cos^2(\theta) \right) = l \cdot j_x \cdot \rho \quad (2.10)$$

Löst man diese Formel nach ρ auf, erhält man die Abhängigkeit des spezifischen Widerstands ohne Einfluss eines externen magnetischen Feldes. Wie man sehr gut erkennen kann, ist die Widerstandskurve eines Permalloy-Streifens nicht linear. Das bedeutet, dass auch die einzelnen Sensormessbrücken nichtlineare Eigenschaften aufweisen.

2.3.3. Der spezifische Widerstand in y-Richtung

Auch in y-Richtung wird der spezifische Widerstand in die Anteile parallel ($E_{\parallel}, j_{\parallel}$) und senkrecht (E_{\perp}, j_{\perp}) aufgeteilt. Das elektrische Strömungsfeld setzt sich nun wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} E_y &= E_{\parallel} \cdot \sin(\theta) - E_{\perp} \cdot \cos(\theta) \\ &= \rho_{\parallel} \cdot j_x \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) - \rho_{\perp} \cdot j_x \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \\ &= j_x \cdot (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Mit der Betrachtung des Spannungsabfalls U_y gelangt man schließlich wieder zur gesuchten Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes vom Winkel θ . Im Unterschied zur Widerstandsbetrachtung in x-Richtung ist hier allerdings nicht der Spannungsabfall über die Länge des Permalloy-Streifens zu betrachten, sondern der Spannungsabfall über die Breite b .

$$U_y = j_x \cdot b \cdot \rho_{\perp} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \quad (2.12)$$

$$\rho_y(\theta) = \Delta\rho \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \quad (2.13)$$

Man erkennt, dass sich der Widerstand ausschließlich bei Beeinflussung des ferrromagnetischen Streifens durch ein externes magnetisches Feld bildet.

2.3.4. Gesamtbetrachtung über das Widerstandsverhalten

Zur Betrachtung des Gesamtwiderstandes setzt man die Näherung $l \gg h$ an. Dadurch, dass die Dicke des ferromagnetischen Streifens im Vergleich zu seiner Länge fast irrelevant geworden ist, kann die Stromdichte parallel zum Streifen angenommen werden. Für den resultierenden Widerstand gilt daher:

$$\begin{aligned} R(\theta) &= \rho_{\perp} \cdot \frac{l}{b \cdot h} + \Delta\rho \cdot \frac{l}{b \cdot h} \cdot \cos^2(\theta) \\ &= R + \Delta R \cdot \cos^2(\theta) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Man kann hieraus ableiten, dass es beim Widerstand zwei Extrema geben muss. Das erste Extrem besteht sobald $\theta = 0^\circ$ hat. Hier wird $R(\theta)$ sein Maximum erreichen. Das zweite Extrem stellt sich ein bei $\theta = 90^\circ$. Dort wird $R(\theta)$ minimal werden. Minimal bedeutet in diesem Fall des AMR-Effekts allerdings nur eine Veränderung des Gesamtwiderstands R um wenige Prozent.

2.3.5. Anmerkungen zum Verhalten im externen Feld

Der betrachtete ferromagnetische Streifen, unter der Annahme $l \gg h$ sorgt dafür, dass sich der Stromfluss parallel zum Streifen einstellt. Die Achse des Stromflusses kann auch als *easyAxis* bezeichnet werden. Mit der *easyAxis* wird die minimale magnetisierungsabhängige Energieachse bezeichnet. Sie bildet die Ruhelage für die interne Magnetisierung M_s , ohne Einfluss eines externen magnetischen Feldes.

Beim Auftreten eines externen magnetischen Feldes H_{ext} , bildet sich zwischen H_{ext} und der *easyAxis* ein Winkel γ aus. Die interne Magnetisierung M_s versucht dem externen Feld H_{ext} zu folgen. Ist H_{ext} vom Betrag her groß genug, wird sich M_s auf die gleiche Richtung einstellen. Ist H_{ext} vom Betrag her nicht groß genug, wird die interne Magnetisierung M_s , nur um einen geringeren Winkel φ abgelenkt. Bild (2.4) zeigt die *easyAxis* zusammen mit der internen Magnetisierung M_s .

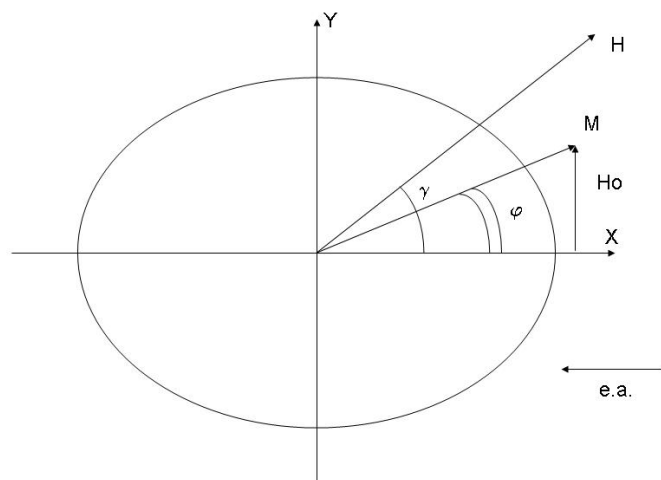


Bild 2.4.: Easy Axis [1]

Wie groß das externe magnetische Feld mindestens sein muss, um die interne Magnetisierung M_s vollständig zu drehen, gibt das charakteristische Feld H_0 an. H_0 setzt sich aus dem Anisotropiefeld H_k und dem Entmagnetisierungsfeld H_d zusammen.

$$H_k = \frac{2 \cdot k}{M_s} \quad (2.15)$$

Das Anisotropiefeld H_k setzt sich aus der Materialkonstante k und M_s zusammen. H_k ist also vollständig materialabhängig.

Das Entmagnetisierungsfeld H_d

$$H_d = -N \cdot M_s \quad (2.16)$$

besteht aus M_s und dem sogenannten Entmagnetisierungsfaktor N , der sich wiederum aus den achsenabhängigen Entmagnetisierungsfaktoren N_x , N_y und N_z zusammen setzt. Da angenommen wurde, dass die Höhe h vernachlässigbar ist, fällt der Faktor N_z weg. Somit bildet sich N aus:

$$N = N_x - N_y \quad (2.17)$$

Das Bild (2.5) zeigt den Stoner-Wohlfarth-Astroid. Zu sehen ist dort das Ergebnis einer Funktion, welche anzeigt wo es Gebiete mit Energieminima gibt:

$$|H_x|^{\frac{2}{3}} + |H_y|^{\frac{2}{3}} = |H_0|^{\frac{2}{3}} \quad (2.18)$$

Liegt das äußere Magnetfeld H_{ext} betragsmäßig innerhalb des Astroiden, ergeben sich zwei Tangenten und somit zwei Winkel φ , was zu zwei möglichen Lagen der internen Magnetisierung M_s führt. Für eine stabile Lage muss der Betrag von H_{ext} außerhalb des Astroiden liegen. Jetzt gibt es nur noch eine eindeutige Lage von M_s . H_{ext} sollte also betragsmäßig außerhalb des von H_0 gebildeten Astroiden liegen um zu gewährleisten, dass die interne Magnetisierung M_s auch ausreichend aus der Ruhelage heraus gezogen wird. Ein negativer Effekt des charakteristischen Feldes H_0 , welcher beobachtbar ist, wäre zum Beispiel eine Hysterese.

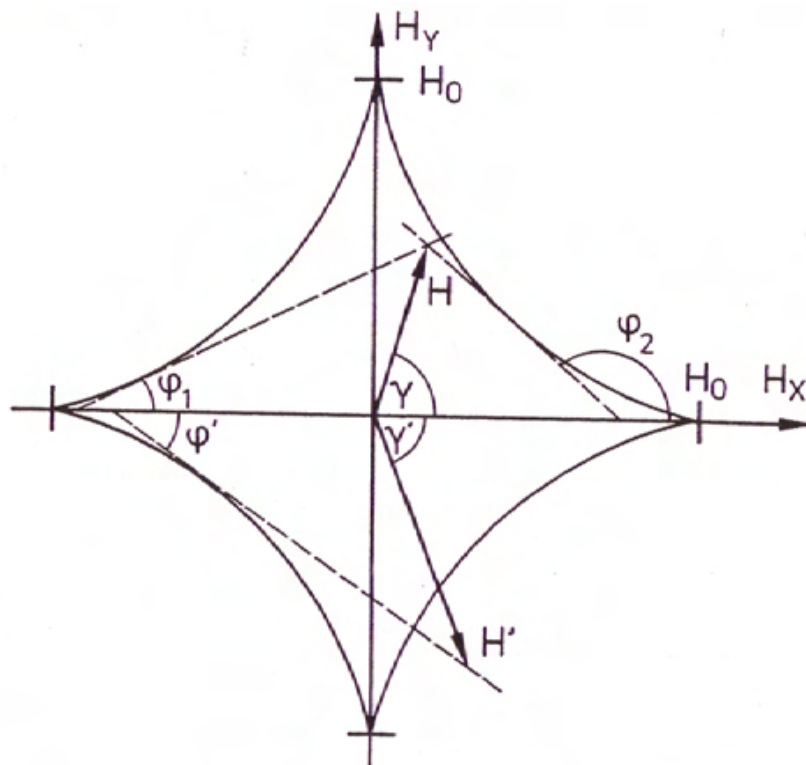


Bild 2.5.: Stoner-Wohlfarth-Astroid [1]

3. Winkelsensor

In diesem Kapitel soll der Winkelsensor näher beschrieben werden. Dieser Abschnitt beinhaltet den grundlegenden Aufbau des Winkelsensors, angefangen mit der theoretischen Grundlage der Wheatstone Messbrücke. Nach der Beschreibung der Grundfunktion folgt eine genauere Erklärung über die in dieser Diplomarbeit verwendeten Typen von AMR-Winkelsensoren. Den Abschluss bildet eine Betrachtung über mögliche Ursachen für Winkelfehlmessungen.

3.1. Messbrücken

Die messtechnische Grundlage der Winkelsensoren bildet die Wheatstone Messbrücke. Ein schematischer Aufbau ist in Bild (3.1) zu sehen. Wie zu erkennen ist, besteht die Messanordnung aus zwei parallelen Spannungsteilern. Im abgeglichenen Zustand ist die Brückenspannung zwischen den Spannungsteilern Null. Sobald aber einer der Widerstände aus dem Spannungsteiler nicht mehr abgeglichen ist, wird eine Brückenspannung zwischen den parallelen Spannungsteilern erzeugt. Ursprünglich wurde diese Methode benutzt, um Widerstände miteinander abzugleichen. Im Fall der Winkelsensoren bestehen die einzelnen Widerstände der Wheatstone Messbrücke aus anisotropen magnetoresistiven Widerstandselementen. Genaueres hierzu im folgenden Abschnitt. Es folgt eine kurze mathematische Beschreibung der Brückenspannung $U_{Bruecke}$.

$$U_{Bruecke} = U_1 - U_3 = U_0 \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.1)$$

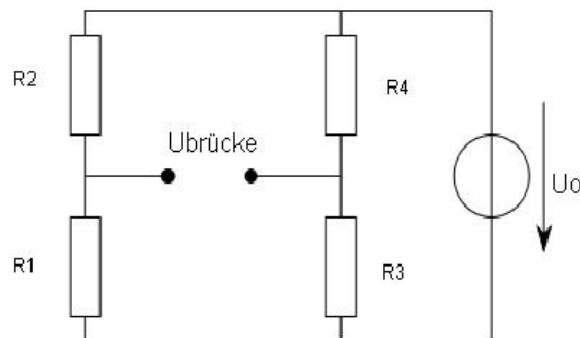


Bild 3.1.: Wheatstone Messbrücke

3.1.1. Kosinus- und Sinus-Brücke

Ein Winkelsensor besteht aus zwei Messbrücken in Wheatstone Anordnung. Die Messbrücken sind zueinander um 45° verdreht, so dass deren Ausgangssignale um 90° phasenverschoben sind. Da dies einer Sinus- und Kosinusschwingung nahe kommt, werden die Messbrücken auch SIN- und COS-Brücke genannt. Bild (3.2) zeigt die schematische Anordnung der Messbrücken. Diese liegen dicht nebeneinander, so dass die fertige Grundfläche einem Achteck nahe kommt.

Die Messbrücken bestehen aus einem ferromagnetischem Stoff, genauer einer Nickel-Eisen Legierung (Ni19Fe81) [9]. Jeder dieser magneto-resistiven Streifen verändert seinen Widerstandswert in Abhängigkeit vom Winkel zwischen einem von außen angelegten Feld und seiner inneren Magnetisierungsrichtung. Siehe hierzu genauer das Kapitel (2.3) über den anisotropen magneto-resistiven Effekt. Das Brückenausgangssignal für eine Messbrücke würde ein Sinus ergeben mit einer Winkel-Messbereich von 90° . Durch Hinzunahme der zweiten Messbrücke wird der Winkel-Messbereich auf 180° verdoppelt. Resultierend daraus kommt es auch, dass ein Winkelsensor auf eine komplette Drehung des äußeren magnetischen Feldes mit einer doppelten Frequenz antwortet, da der Sensor für eine volle Umdrehung des äußeren Magnetfeldes von 360° zwei 180° Durchgänge benötigt. Das sinusförmige Ausgangssignal lässt sich mit Formel (3.2) erläutern, welche bereits genauer in Kapitel 2 erörtert wurde.

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cdot \cos^2(\alpha) \quad (3.2)$$

Bild (3.3) zeigt einen typischen Verlauf für die Brückenausgangssignale. Zu erkennen sind

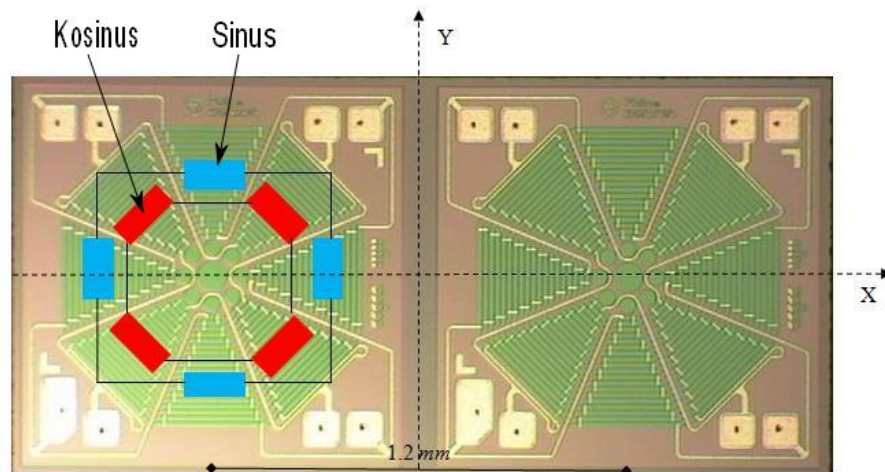


Bild 3.2.: Aufbau der Wheatstone Messbrücken in einem Winkelsensor [12], links erweitert um eine Markierung der Kosinus- und Sinus-Messbrücke. Rechts ist eine Ansicht ohne Markierung zu sehen.

die Ausgangssignale der Sinusbrücke und der Kosinusbrücke, aufgetragen über eine volle Umdrehung des externen Feldes um den Winkelsensor.

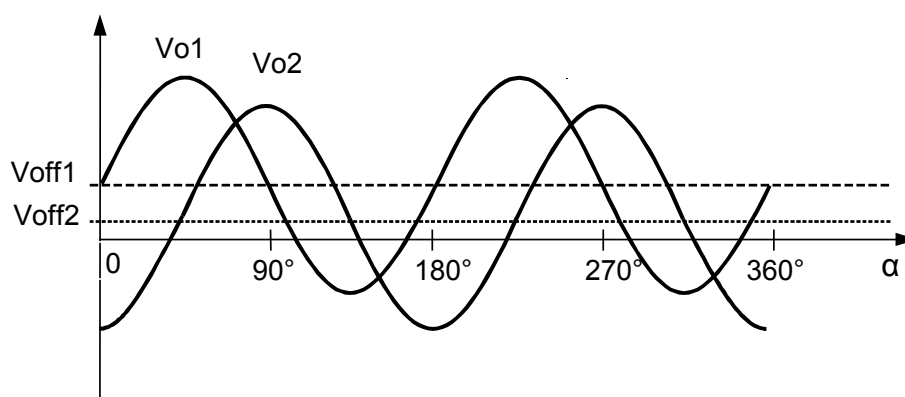


Bild 3.3.: Ausgangssignale der Messbrücken im Winkelsensor [14]

Um welchen Betrag genau sich nun ein äußeres magnetisches Feld um den Sensor gedreht hat, erkennt man anhand der beiden Brückenausgangssignale. Der Winkel ergibt sich in einem Verhältnis der beiden Amplituden. Folgende mathematische Beschreibung verdeutlicht dieses:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{V_{out2}}{V_{out1}} \right) \quad (3.3)$$

Wobei V_{out2} den Amplitudenwert der Sinus-Messbrücke repräsentiert und V_{out1} den Amplitudenwert der Kosinus-Messbrücke. Zu sehen ist auch, dass die beiden Ausgangssignale

einen unterschiedlichen Offset aufweisen. Idealerweise würden beide Signale einen Offset von Null besitzen. Doch obwohl beide Messbrücken auf einem Siliziumträger sind, spielen Temperatureinflüsse eine große Rolle und müssen nicht zwangsweise den gleichen Effekt auf die Sensorsignale haben. Dieses und Herstellungstoleranzen sorgen für einen Offset der beiden Ausgangssignale. Die Amplitude der Signale ist ebenfalls abhängig von der Temperatur. So weist der AMR-Effekt einen negativen Temperaturkoeffizienten auf. Dieses bedeutet, dass bei höheren Temperaturen die Amplitude kleiner wird. Der Faktor beträgt ca. $-0,31\%/K$.

3.2. Winkelsensor KMA 199e

In diesem Abschnitt soll kurz erläutert werden, wie der Winkelsensor KMA 199e der Firma NXP funktioniert [8]. Im Originalzustand besteht der Sensor aus einem Sensorkopf und einem Signalverarbeitungskörper. In der Signalverarbeitung werden als erster Schritt die Brückenausgangssignale in einem 1-Bit-Umsetzer, durch eine $\Sigma\Delta$ -Modulation in positive oder negative Spannungen zerlegt. Durch einen nachgeschalteten Digitalfilter wird das analoge Eingangssignal auf diese Weise in ein diskretes Signal konvertiert, welches anschließend digital verarbeitet werden kann. Die nächsten Arbeitsschritte bestehen aus einer Minimierung des Signaloffsets, Berechnung des Winkels mittels CORDIC-Algorithmus, Nullwinkel und Winkelfehler Justierung. Dies alles erfolgt mittels eines implementierten on-Board-Mikrocontrollers. Zur Justierung greift der Mikrocontroller auf einen EEPROM zu, auf welchem Kalibrierungskonstanten abgelegt sind. Zwischenergebnisse werden in einem RAM gespeichert. Die endgültige Ausgabe des Winkels erfolgt auf zwei verschiedene Arten. Zum einen kann man den Winkel über einen SPI kompatiblen Ausgang (CMOS fähig) ausgeben, zur direkten Weiterverarbeitung auf digitaler Signalverarbeitungsebene. Die zweite Möglichkeit besteht darin, zwei analoge Brückensignale auszugeben. Zu diesem Zweck wird das digitale Signal über einen eingebauten digital/analog-Umsetzer ausgegeben.

Da der Winkelsensor KMA 199e in dieser Diplomarbeit nur eine untergeordnete Rolle spielt, als Referenz zum KMZ60, wird nicht weiter auf die Spezifikationen eingegangen. Daher wurde zu diesem Zweck der Sensorkopf vom Signalverarbeitungskörper getrennt und die Brückenausgangssignale unverfälscht ausgewertet. Die so geplante Referenzmessung wurde dann aber aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt. Außerdem bereitete die Platzierung des KMA199e im Kreuzspulenfeld Probleme. Da der KMA199e eine andere Bauform als der KMZ60 besitzt, mussten für die Sensorhalterung extra Platinen gefertigt werden. Die Justierung auf den Platinen (parallel zur Platine, exakt mittig), erwies sich als zu aufwendig. Daher wurde auf Referenzmessungen vollständig verzichtet. Der KMA199e dient hier nur zur Demonstration, welche unterschiedlichen Bauformen und Typen an Winkelsensoren der Firma

NXP existieren. Für weitere Informationen wird auf das Datenblatt des KMA 199e verwiesen [8].

3.3. Winkelsensor KMZ 60 V1B

Der Winkelsensor mit dem die Messungen in dieser Diplomarbeit erfolgten, ist der KMZ60 V1B. Sein prinzipieller Aufbau gleicht dem des KMA199e. Allerdings wurden hier verbesserte Temperaturkompensierungen vorgenommen. Die Temperatur spielt bei den Winkelsensoren eine wichtige Rolle, da der Einsatzbereich zwischen -40°C und $+150^{\circ}\text{C}$ schwanken kann. Diese Temperaturdifferenzen haben erhebliche Auswirkungen auf das Verhalten der Widerstände in den Messbrücken und somit direkten Einfluss auf die Ausgangssignale der Messbrücken. Beim KMZ60 V1B besteht die Möglichkeit die Temperaturkompensation ein- oder auszuschalten. Dieses erfolgt, indem man an den entsprechenden TACC-Pin die Versorgungsspannung oder die GND-Spannung ($V_{TACC} = V_{DD}$ oder $V_{TACC} = 0$) anlegt.

Im Hinblick auf die Aufarbeitung der Ausgangsspannungen bietet der KMZ60 viele Optionen [9]. Die Optionen welche mit der Pin-Belegung aktiviert oder deaktiviert werden, sollen hier kurz erläutert werden. Die 8 Ein- bzw. Ausgänge sind folgendermaßen benannt:

V_{DD} Pin für die Versorgungsspannung. Diese kann zwischen 2,5 V und 5,5 V liegen.

GND Nullpotentialanschluss

V_{out1} Ausgangsspannung der Kosinus-Brücke.

V_{out2} Ausgangssignal der Sinus-Brücke.

$TACC$ Dieser Eingang wird genutzt um die Temperaturkompensation zu aktivieren. Es werden zwei Modi unterschieden:

- Wenn der TACC-Pin mit V_{DD} verbunden wird, ist der Temperaturkoeffizient des Ausgangssignals vom Sensor fast vollständig durch einen Operationsverstärker kompensiert. (Verwendeter Betriebsmodus während der Messungen)
- Wenn der TACC-Pin mit GND (oder V_{DD}) verbunden wird, liegt das mit einem negativen Temperaturkoeffizienten behaftete Ausgangssignal an den Ausgängen V_{out1} und V_{out2} an

V_{TEMP} Mittels V_{TEMP} kann man, unabhängig von der Belegung des TACC-Pin, die temperaturabhängige Ausgangsspannung V_{PTAT} abgreifen.

$POWERDOWN$ Versetzt den Chip, inklusive MR-Sensor, in den gleichnamigen Modus. Hierbei werden die Eingänge V_{out1} und V_{out2} hochohmig gesetzt.

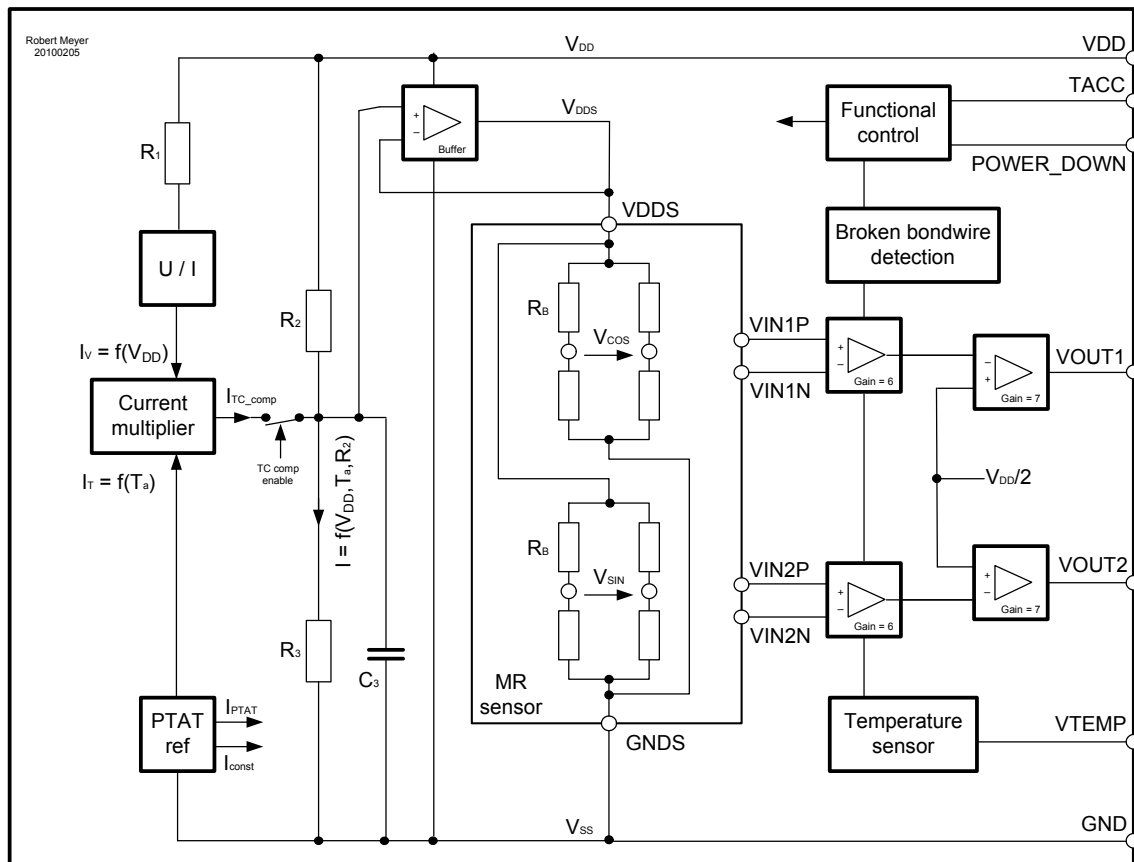


Bild 3.4.: Funktionsdiagramm KMZ60 mit Sensorbrücken [9]

Eine implementierte broken bond wire detection (eine Art Leitungsüberwachung) überwacht alle internen Verbindungen zum MR-Sensor. Im Fehlerfall werden die Ausgangsspannungen V_{out1} und V_{out2} auf GND gebracht. Im Gegensatz zum KMA199e kann beim KMZ60 V1B nicht direkt auf die Brückenausgangssignale zugegriffen werden. Ein Funktionsdiagramm des KMZ60 ist in Bild (3.4) zu sehen.

Wichtig für die Messungen in dieser Diplomarbeit ist die Kenntnis über die folgenden Betriebsgrößen des KMZ60¹ [9]:

- die Größe der Versorgungsspannung V_{DD} ;
- die Abhängigkeit der Amplitude der Brückenausgangsspannungen $V_{out1,2}$ in Abhängigkeit von der angelegten Versorgungsspannung V_{DD} und der Temperatur T_a ;

¹Der Winkelsensor KMZ60 V1B wird im Folgenden nur noch abgekürzt KMZ60 genannt.

- die Abhängigkeit der Offsetspannung $V_{Off1,2}$ in Abhängigkeit der Temperatur T_a und der Versorgungsspannung V_{DD} ;
- die minimale Feldstärke H_{ext} eines äußeren magnetischen Feldes, welche benötigt wird damit der Winkelsensor auch genau genug arbeiten kann;
- eine Kenntnis über den Winkelfehler $\phi_{err,0}$ welcher durch die Referenzposition verursacht wird, dieser Fehler stellt einen absoluten Wert dar und ist nur abhängig von der Einbaugenauigkeit;
- die Ungenauigkeit der Winkelmessung in einem statischen magnetischen Feld (berechnet ohne die 3. und 5. harmonische Schwingung) Δ_α .

Genauere Angaben zu den Größen der einzelnen Parameter gibt die Tabelle (3.1). Als Anmerkung zur Referenzposition sei auf Bild (3.5) verwiesen. Hier wird die Position der Messbrücken inklusive des maximalen Einbaufehlers dargestellt. Dieser Fehler ist bedingt durch die Fertigung des Winkelsensors und kann nicht genauer spezifiziert werden als durch den angegebenen maximalen Winkelfehler $\phi_{err,0}$. Bei der Ungenauigkeit der Winkelmessung wurde deshalb auf die 3. und 5. Harmonische verzichtet, weil diese Oberschwingungen sich speziell auf nicht statische Felder anwenden lassen. Das bedeutet, an der Größe dieser Harmonischen kann man erkennen, wie gut der Sensor in einem homogenen magnetischen Feld platziert ist. Weiterhin sei angemerkt, dass die Winkelungenauigkeit eines statischen Feldes geringer ist als die Genauigkeit gegenüber einem rotierenden, nicht statischen Feld. Als Grund hierfür kann angenommen werden, dass der Winkelsensor selber schon eine eingeprägte Remanenz besitzt, welche sich ungünstig auf die Genauigkeit einer Winkelmessung in rotierenden Feldern auswirkt.

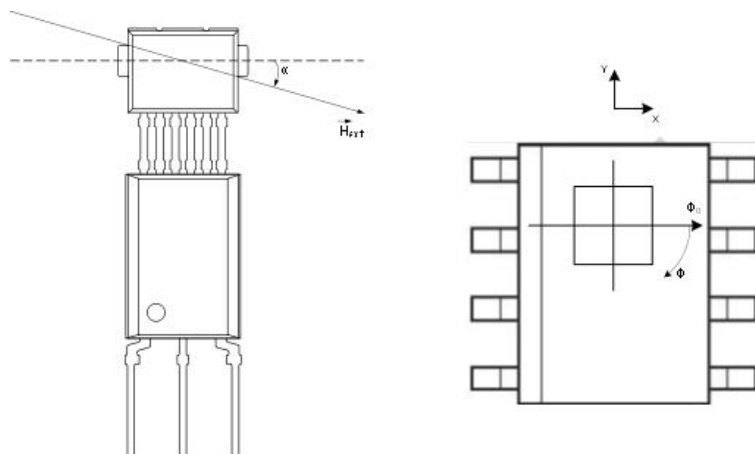


Bild 3.5.: Einbauposition der Messbrücken. Links: KMA199e [8], rechts: KMZ60 [9]

Symbol	Min.	Typ.	Max.	Einheit	Bedingung
Δ_α	-0,1		0,1	°	statisches Feld
H_{ext}	25		-	$\frac{kA}{m}$	
$\phi_{err,0}$	-2,5		2,5	°	
V_{DD}	2,7		5,5	V	
$V_{out1,2}$	$0,46 \cdot V_{DD}$	$0,56 \cdot V_{DD}$	$0,70 \cdot V_{DD}$	V	$V_{TACC} = V_{DD}; T_A = 25^\circ C$
	$0,42 \cdot V_{DD}$	$0,53 \cdot V_{DD}$	$0,70 \cdot V_{DD}$	V	$V_{TACC} = V_{DD}; T_A = 85^\circ C$
$V_{Off1,2}$	$-0,08 \cdot V_{DD}$		$0,08 \cdot V_{DD}$	V	$V_{TACC} = V_{DD}; T_A = 25^\circ C$
	$-0,09 \cdot V_{DD}$		$0,09 \cdot V_{DD}$	V	$V_{TACC} = V_{DD}; T_A = 85^\circ C$

Tabelle 3.1.: Parameter des KMZ60 [9]

Für eine eingehendere Beschreibung wird auf das Datenblatt des KMZ60 [9] verwiesen. Hier sind im Detail alle wichtigen Beziehungen zwischen Ausgangsspannung und Temperatur sowie Versorgungsspannung erläutert.

3.4. Ursachen für Winkelfehlmessungen

Es gibt drei mögliche Ursachen für Winkelfehlmessungen. Diese sind zum einen die Auswirkungen einer zu geringen magnetischen Feldstärke des zu messenden Feldes. Die nächste mögliche Quelle für Winkelfehler beruht auf Effekten von Inhomogenitäten des zu messenden Feldes. Und als letzten Punkt muss man den Winkelsensor und seine Komponenten selber als mögliche Fehlerquellen in Betracht ziehen. Im Folgenden werden die drei Fehlerquellen und ihre Auswirkungen näher beschrieben. Mögliche Verbesserungen für das zu messende Magnetfeld sind nicht Bestandteil dieses Kapitels und werden daher nicht näher betrachtet.

3.4.1. Geringe magnetische Feldstärke

Für eine fehlerfreie Winkelmessung würde ein Winkelsensor ein unendlich starkes externes Magnetfeld benötigen. Nur so kann sicher gestellt werden, dass eine vollständige Sättigung des ferromagnetischen Werkstoffs innerhalb der Sensormessbrücke erfolgt. Da dieses in der Realität allerdings nicht praktikabel ist, kann es passieren, dass schwache Magnetfelder durch unzureichende Sättigung einen Fehlerwinkel produzieren. Dieser Fehlerwinkel ist das Ergebnis von nicht sinusförmigen Brückenausgangssignalen, da bei einer unzureichenden

Sättigung die Brückenausgangssignale eine Verformung annehmen, also mit Oberschwingungen versehen sind. Da sich der aktuelle Winkel im externen Magnetfeld aus dem Quotient der beiden Brückenausgangssignale errechnet, kann es hier zu Winkelfehlern kommen.

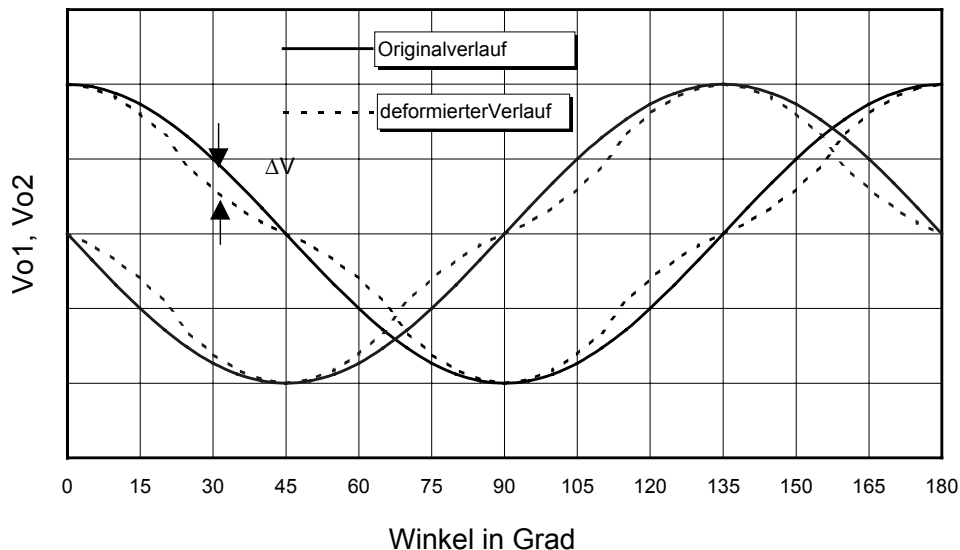


Bild 3.6.: Signalfehler auf Grund von geringer Feldstärke [15]

Wie in Bild (3.6) zu erkennen ist, wird sich ein Maximum und ein entsprechendes Minimum an Winkelfehlmessungen ausbilden. Das Minimum findet sich an den Stellen, an denen die Verformung des Brückenausgangssignals der ursprünglichen Form entspricht. Dementsprechend findet sich das Maximum an der Stelle, an der eine größtmögliche Abweichung von der idealen Brückenausgangsspannung erkennbar ist. Bild (3.7) zeigt die Form des Winkelfehlers, betrachtet über einen vollen Winkelumlauf. An den Stellen $11,25^\circ$ und $33,37^\circ$ bildet sich der größte Winkelfehler heraus, da an diesen Stellen die angesprochene Abweichung vom Idealverlauf am größten ist. Dieses resultierende Signal kann man als Summe der 2. bis 5. Harmonischen in einer HD^2 -Berechnung ausmachen.

Um diese Art der Winkelfehler zu vermeiden ist es notwendig, hohe externe Magnetfelder zur Winkelmessung zu verwenden. Im Fall des KMZ60 wird ein minimales magnetisches Feld von $25 \frac{kA}{m}$ vorausgesetzt. Messungen der Firma NXP ergaben, dass selbst das Erdmagnetfeld mit seinen ca. $30 \frac{A}{m}$ schon zu Winkelfehlern führen kann [15] und [9].

3.4.2. Effekte auf Grund von Feldinhomogenitäten

Eine weitere Fehlerquelle stellen Feldinhomogenitäten da. Damit sind Bereiche des zu messenden Magnetfeldes gemeint, in denen die Feldlinien nicht im gleichen Abstand und parallel

²HD = Harmonic Distortion. Im deutschen auch Klirrfaktor genannt.

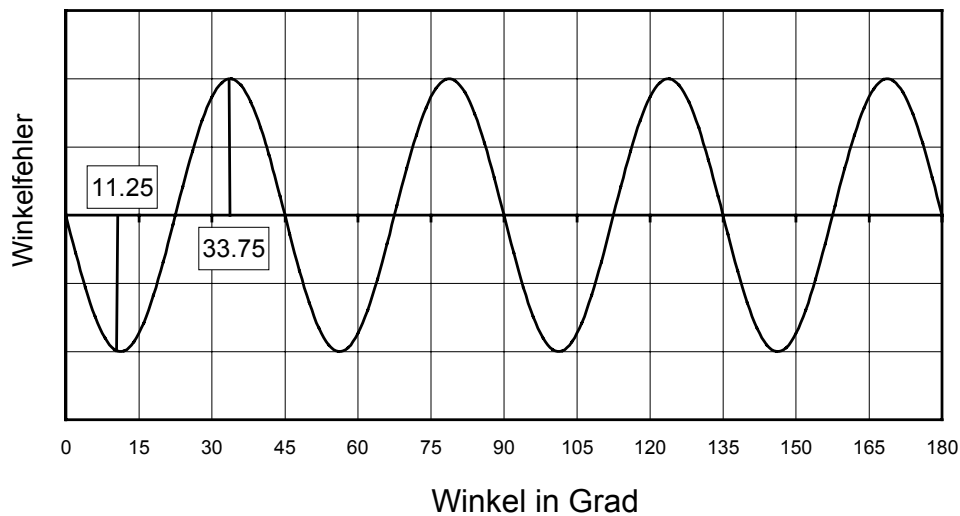


Bild 3.7.: Form des Winkelfehlers hervorgerufen durch zu geringes Feld [15]

zueinander sind. Das Maß für ein solches Feld kann als Gradient³ bezeichnet werden. Die Ursache eines solchen Fehlerwinkels liegt darin begründet, dass die Messoberfläche des Sensors in einem solchen magnetischen Feld mit geringem Gradienten, nicht gleichmäßig durchdrungen wird. Die Messfläche besitzt die Ausmaße von knapp 1,1 mm x 1,1 mm. Eine ungleichmäßige Durchdringung dieser Fläche sorgt dafür, dass die zwei unterschiedlichen Messbrücken einer Sensorhalbbrücke unterschiedlichere Widerstandswerte annehmen, als sie es bei einer homogenen Durchdringung erfahren hätten.

Praktisch kann man sich das Entstehen dieses Fehlerwinkels so vorstellen, dass man den Sensor nicht in der Gleichgewichtsmitte der Sensoroberfläche als Rotationsmittelpunkt in einem Magnetfeld rotieren lässt, sondern um einen Radius r verschoben. Auch Verkippungen des Sensors innerhalb eines Magnetfeldes mit geringem Gradienten können als Feldinhomogenitäten interpretiert werden. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Verkippung des Sensors auf seiner Y-Achse bis zu 5° als nicht Einfluss nehmend angesehen werden kann. Eine Verkippung auf der Sensor X-Achse hat bereits bei einer Größenordnung von weniger als 1° Auswirkungen auf die Messgenauigkeit des Winkelsensors. Siehe hierzu [12].

Dieses Phänomen lässt sich bei dem vorliegenden Messplatz selbstverständlich nicht gänzlich ausschließen. Wie die Auswertung der Messreihen gezeigt hat, stellt diese Fehlerquelle

³Der Gradient ist ein mathematischer Operator, welcher auf Vektorfelder angewandt werden kann. Er beschreibt die Veränderung der Vektoren als partielle Ableitung. Wenn der Gradient eines Vektorfeldes groß ist, bedeutet dies, dass an dieser Stelle die räumliche Veränderung der Vektoren groß ist. Also ein inhomogener Verlauf gegeben ist.

sogar die Hauptursache für Winkelfehlmessungen mit dem Messplatz dar. Siehe hierzu auch Kapitel (4.4).

3.4.3. Einfluß der Winkelsensorkomponenten

Wie in diesem Kapitel bereits beschrieben wurde, besteht z.B. der Winkelsensor KMZ60 zusätzlich zur Messbrücke noch aus nachgeschalteten Verstärkerschaltungen. Diese Komponenten unterliegen außer einem Temperatureinfluss auch Alterungsprozessen, daher wird ein Winkelsensor selten die idealen sinusförmigen Signale an den Brückenausgängen zur Verfügung stellen. Diese Faktoren machen sich unterschiedlich bemerkbar, wie im Folgenden erläutert wird.

Offset und Offsetverschiebung

Die sinusförmigen Brückenausgangssignale zeigen oft Offsets, welche negativen Einfluß auf die Winkelgenauigkeit haben. Der Offset lässt sich in zwei Komponenten zerlegen. Zum einen in einem konstanten Offset, welcher aber normalerweise schon bei der Sensorproduktion unterdrückt wird. Dieses geschieht durch Trimmwiderstände. Die zweite Komponente ist ein temperaturabhängiger Offset. Er hängt von der angelegten Versorgungsspannung und der Umgebungstemperatur des Winkelsensors ab. Für den KMZ60 ergibt sich dieser Offset bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C und in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung V_{DD} in dem mathematischen Zusammenhang (3.4 und 3.5).

$$V_{out1,offset} = (\pm 0,08 \cdot V_{DD}) + 0,5 \cdot V_{DD} \quad (3.4)$$

$$V_{out2,offset} = 0,5 \cdot V_{DD} - (\pm 0,08 \cdot V_{DD}) \quad (3.5)$$

Daraus ergibt sich für die Brückenausgangssignale, in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, folgender Zusammenhang (mit X_0 , Y_0 als Amplitude der Brückensignale und Δx , Δy als Offset-Spannungen):

$$V_{out2} = X_0 \cdot \sin(2\alpha) + \Delta x \quad (3.6)$$

$$V_{out1} = Y_0 \cdot \cos(2\alpha) + \Delta y \quad (3.7)$$

Der absolute Winkelfehler in Abhängigkeit vom aktuellen Winkel ergibt sich aus:

$$E_{offset}(\alpha, \Delta x, \Delta y) = \left| \alpha - \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{X_0 \cdot \sin(2\alpha) + \Delta x}{Y_0 \cdot \cos(2\alpha) + \Delta y} \right) \right| \quad (3.8)$$

Wenn beide Brückenausgangssignale den gleichen Offset haben ($\Delta x = \Delta y$), beträgt der maximale Winkelfehler [15]:

$$E_{offset,Max} = 0,4^\circ / \%Amplitude \quad (3.9)$$

Bild (3.8) zeigt den Winkelfehlerverlauf welcher von einem Signaloffset hervorgerufen wird.

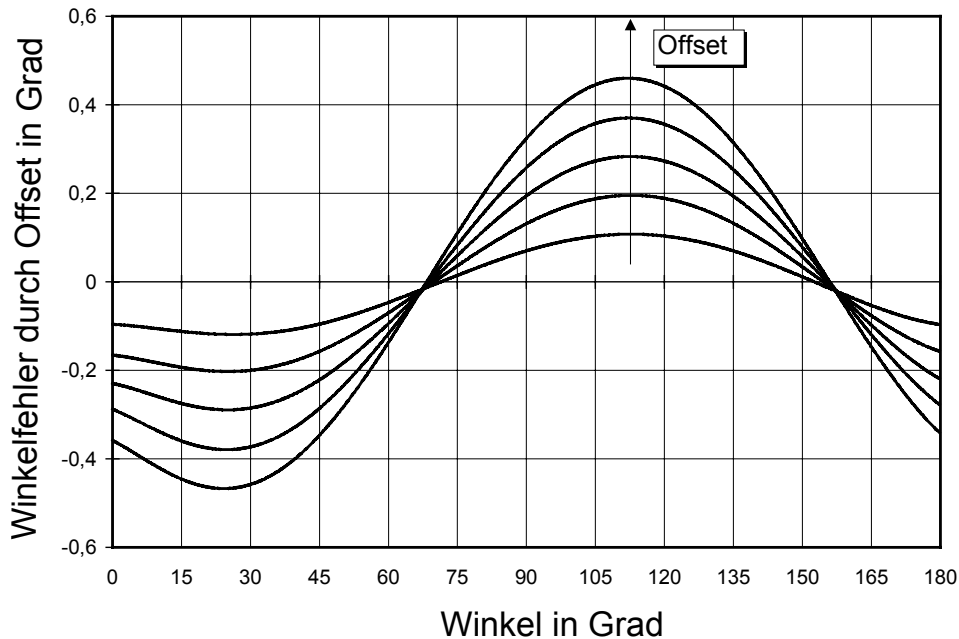


Bild 3.8.: Winkelfehlerverlauf bedingt durch einen Offset [15]

Differenz der Brückenausgangsamplituden

Wie bereits zu Anfang dieses Kapitels beschrieben, besteht ein Winkelsensor aus zwei Messbrücken. Bautechnisch jedoch befinden sich die zwei unterschiedlichen Wheatstone Messbrücken für die Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} auf demselben Silizium Substrat. Trotzdem kann es vorkommen, dass die Ausgangsamplituden der beiden Messbrückenausgangssignale unterschiedlich groß sein können. Der Winkelfehler welcher sich durch diese Fehlerquelle ergibt, lässt sich durch folgende Formel ausdrücken:

$$E_{Amplitude}(\alpha, A) = \left| \alpha - \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(A \cdot \frac{\sin(2\alpha)}{\cos(2\alpha)} \right) \right| \quad (3.10)$$

Formel (3.10) zeigt den zu erwartenden Fehlerwinkel in Abhängigkeit vom gemessenen Winkel und dem Verhältnis der beiden Ausgangsamplituden $A = \frac{X_0}{Y_0}$. Hieraus lässt sich auf einen

maximalen Fehlerwinkel schließen [15]:

$$E_{Amplitude,Max} = 0,158^\circ/\% \quad (3.11)$$

Dieser Fehlerwinkel bedeutet, dass bei einem Unterschied von 1% zwischen den beiden Ausgangssignalen in ihrer Amplitude ein Fehlerwinkel von $0,158^\circ$ auftritt.

Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen

Als letztes soll noch die Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen als Fehlerquelle untersucht werden. Bei einem idealen Winkelsensor wäre die Phasenverschiebung zwischen den Signalen V_{out1} und V_{out2} genau 90° , so wie es sich zwischen einem reinem Sinussignal und Kosinussignal verhalten würde. Eine Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen würde automatisch einen Fehlerwinkel mit sich bringen, da der Spannungsunterschied zwischen den beiden Signalen nicht mehr dem Wert entspricht, welcher eigentlich für den Winkel vorhanden sein müsste. Dadurch, dass der Fehlerwinkel eine Abhängigkeit vom aktuellen Winkel hat, ist er über eine komplette Drehung nicht konstant. Die folgende Formel beschreibt diesen Effekt:

$$E_{Phase}(\alpha, \Delta\beta) = \left| \alpha - \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{\sin(2\alpha + \Delta\beta(\alpha))}{\cos(2\alpha)} \right) \right| \quad (3.12)$$

Ausgehend von einem konstanten Phasenfehler ergibt sich der maximale Winkelfehler als [15]:

$$E_{Phase,Max} = 0,5^\circ / \text{Phasenverschiebung} \quad (3.13)$$

Konstanter Winkelfehler durch Einbauposition

Bedingt durch den Einbau der Messbrücken in das Gehäuse des Winkelsensors kann es hier zu einem konstanten Winkelfehler kommen. Dieser Winkelfehler, benannt ϕ_{err} , ist in Bild (3.9) dargestellt. Er wird definiert in einem magnetischen Feld mit niedrigem Gradienten, als der Winkel welcher durch Messung erfasst wird. Bei einem Winkel von 0° fällt die Einbauposition exakt mit der vorgesehenen Einbauposition zusammen. Wird ein Winkel angezeigt, so ist dieser die Verkippung der realen Einbauposition zur vorgesehenen. Die vorgesehene Einbauposition befindet sich mit der y-Achse genau in der Mitte des Gehäuses und mit der x-Achse auf einer gedachten Achse zwischen dem zweiten und siebten Pin des Gehäuses.

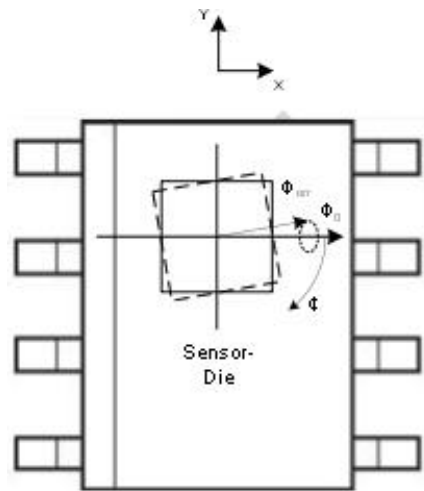


Bild 3.9.: Winkelfehler durch Einbauposition [9]

Zusammenfassung Winkelmessungen

Zusammenfassend kann man sagen, dass ein Fehler der von einem zu schwachen magnetischen Feld hervorgerufen wird als vernachlässigbar gilt. Wenn allerdings die geforderte minimale Feldstärke von $24 \frac{kA}{m}$ (KMZ60) nicht erreicht wird, muss auch diese Fehlerquelle berücksichtigt werden. Die anderen beiden Fehlerquellen lassen sich leider nicht vollständig vermeiden, da sie von der Umgebungstemperatur und einer Phasenverschiebung abhängen. Fasst man alle drei Fehler unter statistischen Gesichtspunkten zusammen, dann ergibt sich folgende Formel [15]:

$$E_{Max} = \sqrt{E^2_{Offset,Max} + E^2_{Amplitude,Max} + E^2_{Phase,Max}} \quad (3.14)$$

Will man einen kompletten Fehlerwinkel für das gesamte System Winkelsensor (bezogen auf den KMZ60) ermitteln, muss man auch noch die elektrischen Komponenten nach der Messbrücke berücksichtigen. Da das ausgegebene Brückenausgangssignal noch einer Signalkonditionierung unterzogen wird, müssten zu einer vollständigen Erfassung der Winkelmessungen auch diese Komponenten betrachtet werden. Dieses wird hier aber nicht weiter verfolgt. Außerdem ergibt sich ein möglicher Fehlerwinkel bereits durch den Einbau. Bei diesem Prozess wird die Messbrücke mit dem Gehäuse verbunden. Der hierbei auftretende Winkelfehler kann zwischen $-2,5^\circ$ und $+2,5^\circ$ liegen. Es muss allerdings erwähnt werden, dass sich dieser Fehler lediglich dann bemerkbar macht, wenn eine feste Startposition für Winkelmessungen gefordert ist.

3.5. Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen

In diesem Kapitel soll auf eine Diplomarbeit [12] eingegangen werden, welche an der TU Hamburg-Harburg in Zusammenarbeit mit der Firma NXP entstanden ist. Da aus dieser Arbeit einige theoretische Ansätze übernommen wurden und um zu zeigen, dass es hinsichtlich der mechanischen Einflüsse zu Änderungen im Signalverlauf kommen kann, wird hier ein kurzer Überblick dieser Diplomarbeit gegeben.

3.5.1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung zielt auf die Untersuchung von mechanischen Einflüssen auf das Sensorsignal (z.B. durch Verkippung, mechanische Verschiebung des Sensors) ab. Unter Matlab wurde ein Modell des Sensors unter idealen Bedingungen in einem rotierenden magnetischen Feld entwickelt, bei dem die verschiedenen mechanischen Einflüsse berücksichtigt werden können. Durch eine FFT-Analyse kann der Einfluss der ortsabhängigen magnetischen Felder auf den Winkelsensor untersucht und das Verhalten von Oberwellen im Sensorausgangssignal im Zusammenhang mit den resultierenden Winkelfehlern bestimmt werden. Diese Daten wurden mit einem 6-achsigen Rotationsmessplatz verglichen. Ziel ist es, ein Safe Operating Area Region (*SOAR*)-Diagramm zu erstellen. Dies alles ist für den Winkelsensor KMZ48 der Firma NXP durchgeführt worden. Der Unterschied zwischen dem KMZ48 und dem KMZ60 besteht in der Verarbeitung der Brückenausgangssignale.

3.5.2. Durchführung und Ergebnisse

Zuerst wurde ein Verhaltensmodell für den Winkelsensor entworfen. Dieses Verhaltensmodell basiert auf dem AMR-Effekt und beschreibt die Grundfunktion. Diese Grundfunktion zeichnet den Winkelverlauf einer vollen Umdrehung des Sensors im magnetischen Feld nach. Das magnetische Feld ist in diesem Fall das Resultat eines runden Dauermagneten mit den Ausmaßen: Radius 6mm, Höhe 10 mm. Die eingeprägte Magnetisierungsrichtung liegt entlang der X-Achse des Systems. Dieser Dauermagnet wird durch einen Gleichstrommotor unter dem Winkelsensor gedreht. Die Messposition befindet sich genau mittig über dem Rundmagneten. Anschließend wird anhand dieses Modelles der Einfluß der Verschiebung des Sensors in X- und Y-Richtung betrachtet.

Als erster Parameter wurde überprüft, wie sich die Genauigkeit der Winkelmessungen ändert, wenn sich der Winkelsensor nicht exakt über der Rotationsachse des Messaufbaus befindet. In einem solchen Fall würde der Winkelsensor in einem bestimmten Abstand

zum Rotationspunkt verschoben sein und somit in einem Fehlerradius einen Kreis um den Rotationsmittelpunkt beschreiben. Entlang dieser Kreisbahn müssen die veränderten magnetischen Feldeigenschaften und deren Einfluss auf die Winkelmessung betrachtet werden. Es stellte sich heraus, dass je größer der Fehlerradius wird, die Winkelungenauigkeit der Winkelmessungen zunimmt. Bei einem Fehlerradius von 1,5 mm betrug der Winkelfehler schon $0,3^\circ$. Bei einem Abstand von 2 mm ist der Winkelfehler schon auf knapp 1° angewachsen. Daraus lässt sich folgern, dass eine exakte Positionierung auf der Rotationsachse für exakte Winkelmessungen von Bedeutung ist [vgl. [12]; S.61].

Die nächste Fehlerquelle bei mechanischen Aufbauten mit dem Winkelsensor stellen Verkippungen dar. Hier wird unterschieden zwischen einer Verkippung des Sensors auf der X-Achse und der Möglichkeit einer Verkippung auf der Y-Achse. Dazu wurde angenommen, dass nicht der Sensor selber verkippt ist, sondern der Dauermagnet wurde einer entsprechenden Verkippung unterzogen. Das Resultat ist in beiden Fällen gleich. Untersucht wurde jeweils eine Verkippung der jeweiligen Achse im Bereich von 0° bis 5° . Dabei zeigte sich, dass der Winkelsensor empfindlich auf Verkippungen in seiner X-Achse reagiert. Hier wurden bei 5° Verkippungswinkel, Fehlerwinkel von knapp $0,08^\circ$ simuliert. Bei einer Verkippung auf der Y-Achse zeigte sich ein geringer Winkelfehler. Hier lag der Fehlerwinkel bei 5° Verkippung bei simulierten $0,00006^\circ$. Ein solcher Fehlerwinkel kann in dieser Dimension als Null angenommen werden. Als Grund hierfür kann der Aufbau der einzelnen Sensorelemente und deren geometrische Anordnung gesehen werden. [vgl. [12]; S.64 - S.70]

Anschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse über die mechanische Verschiebung auf der X- und Y-Achse und dem daraus resultierenden Winkelfehler einer FFT-Analyse unterzogen. Dabei stellte sich heraus, dass die Harmonischenanteile der 3. und 5. Harmonischen hauptsächlich bei mechanischer Verkippung auftreten. Bei der Gegenüberstellung zwischen Simulation und Realität traten jedoch außer der 3. und 5. Harmonischen noch weitere Harmonische auf. Dieses hängt mit dem MR-Effekt zusammen, welcher als Störfunktion mit eingefügt wurde. Es stellte sich jedoch heraus, dass die neu hinzu gekommenen Harmonischen klein waren in Vergleich zum Betrag der 3. und 5. Harmonischen. Daher wurde beschlossen, nur Harmonische bis zur 5. Harmonischen in die FFT-Analyse einzubeziehen. Die Analyse der Verkippung ergab, dass zur Verkippungsbetrachtung nur die COS-Brücke berücksichtigt wird. Da sich diese Messbrücke als besonders anfällig für mechanische Verkippungen erwies. Der resultierende Fehler lässt sich am ehesten durch die Offsetveränderung erkennen. [vgl. [12]; S.83]

Als letztes wurde die Messposition unter Angabe des THD⁴ betrachtet. Dabei stellte sich

⁴Abkürzung THD für total harmonic distortion

heraus, dass die mechanische Verschiebung in der X- und Y-Achse zu einer Verschlechterung des THD führt. Bei einem simulierten Winkelsensor wurde die optimale Messposition, ohne Einfluss von Verkippung, mit einem THD von -70 dB angegeben. Unter realen Bedingungen zeigte sich, dass ein Wert von knapp -50 dB als realistisch anzunehmen ist. Die Position mit dem niedrigsten Klirrfaktor verspricht die besten Messergebnisse in Hinblick auf zu erwartende Winkelfehler. [vgl. [12](#); S.85]

4. Kreuzspulenfeld

In diesem Kapitel soll das Grundprinzip einer Helmholtz Spule erläutert werden. Dieses Prinzip liegt dem verwendeten Kreuzspulenkasten zu Grunde. Nachdem aufgezeigt wird, wie das Helmholtz Prinzip auf den verwendeten Messaufbau angewandt wurde, wird sich der Beschreibung des resultierenden Magnetfeldes innerhalb des Kreuzspulenkastens zugewandt. Die Verhältnisse innerhalb des Kreuzspulenkastens sind deshalb von Bedeutung, da in diesem Magnetfeld eine möglichst ideale Messposition gefunden werden muss. Diese Position muss eine genügend hohe magnetische Feldstärke H und einem annähernd homogenen magnetischen Fluss B aufweisen. Wie genau die Messposition innerhalb des Kreuzspulenfeldes gefunden werden kann, wird in Kapitel 5 (Positionsbestimmung) näher erläutert.

4.1. Grundprinzip der Helmholtz Spule

In einer Helmholtzspulen-Anordnung [7] sind zwei gleichsinnig bestromte Spulen in einem definierten Abstand zueinander angeordnet. In einer idealisierten Anordnung reduzieren sich die beiden Spulen auf eine einzelne Windung. Der Abstand zwischen den beiden Spulen entspricht dem Radius einer Spule. Ein weiterer, sehr wichtiger Aspekt bei der Helmholtzspulen-Anordnung ist, dass beide Spulen mit ihren Mittelpunkten auf einer Achse liegen müssen. Berücksichtigt man diese wichtigen geometrischen Aspekte bei einem Aufbau einer solchen Spulenordnung, bekommt man als Ergebnis zwischen den beiden Spulen ein magnetisches Feld mit niedrigem Gradienten. Bild (4.1) zeigt die Anordnung der Spulen schematisch, sowie den daraus resultierenden magnetischen Feldlinienverlauf im Raum zwischen den Spulen. Der ideale Punkt innerhalb der Spulenordnung ist genau in der Mitte der beiden Spulen im Abstand d . Wobei $r = 2 \cdot d$ ist. Im Allgemeinen gilt für die Feldstärke innerhalb dieser Anordnung (auf der gemeinsamen Achse), mit h als Abstand von der jeweiligen Spule:

$$H = \frac{I}{2} \left(\frac{r^2}{r^2 + h^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4.1)$$

Eine mögliche Anwendung findet diese Spulenordnung zum Beispiel dabei, innerhalb der Spulen ein magnetisches Feld zu erzeugen, welches sich in Stärke und Richtung entgegengesetzt zum Erdmagnetfeld befindet, um so einen feldfreien Raum zu erzeugen. Die Nach-

teile liegen darin, dass sich auf Grund der geringen Windungszahl der einzelnen Spulen nur relativ schwache Magnetfelder erzeugen lassen. Möchte man die Stärke eines erzeugten Magnetfelds erhöhen, muss der Strom erhöht werden. Dieses wiederum sorgt dafür, dass sich die Spulen übermäßig stark erhitzen und deshalb der Betrieb nur kurzzeitig aufrecht erhalten werden kann.

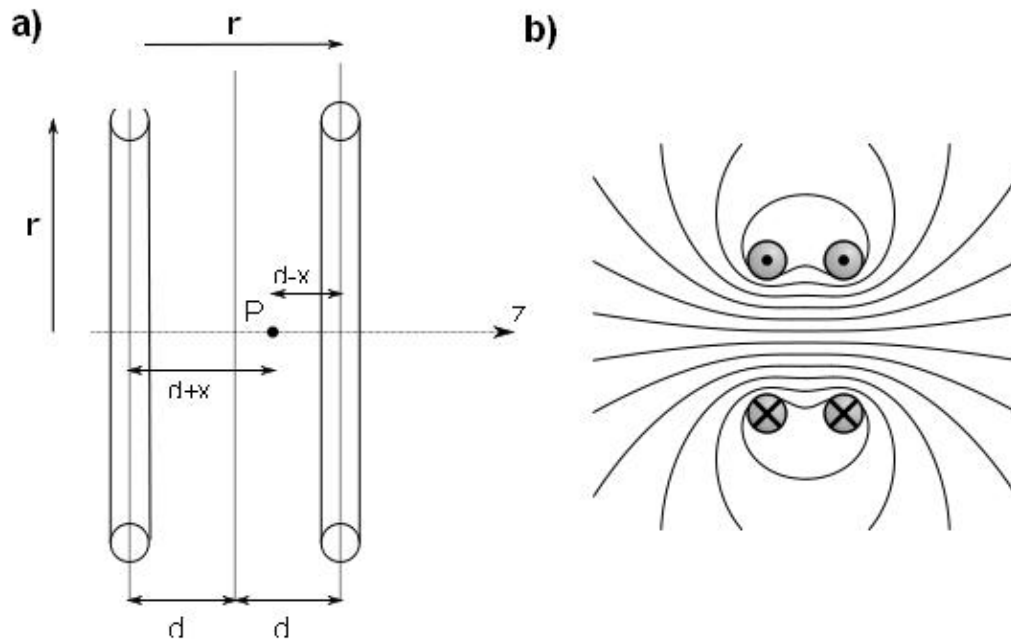


Bild 4.1.: Schematische Spulenordnung (a) und Feldlinienverlauf zwischen den Spulen (b) [4]

4.2. Aufbau der Kreuzspulenkästen

Die Grundlagen der Helmholtzspulen-Anordnung sind in den Bau der Kreuzspulenkästen eingegangen. Hier wurde jedoch zusätzlich ein zweites Spulenpaar, um 90° gedreht, also in Kreuz-Anordnung verbaut. Durch diese Anordnung der Spulenpaare ist die Möglichkeit gegeben, innerhalb des Kreuzspulenkastens beliebige Feldvektoren in der Ebene zu erzeugen. Der große Unterschied zu einer Helmholtz-Anordnung besteht aber nicht in der Erweiterung auf 2 Spulenpaare, sondern darin, dass der Abstand zwischen den Spulen größer ist als der Radius einer einzelnen verbauten Spule. Da hierdurch das Prinzip einer Helmholtzspulen-Anordnung verletzt wird, hat dieses direkte Auswirkungen auf den Feldstärkeverlauf und den Gradienten des magnetischen Feldes innerhalb der Spulenordnung.

Kreuzspulenkasten	Spulenfaktor	Messraum	Spulenradius	Spulentiefe	Verhältnis
klein	1824 $\frac{1}{m}$	5,8 cm	1,75 cm	1,5 cm	1 : 3,74
	bis 1825 $\frac{1}{m}$	x 5,8 cm			
mittel	7736 $\frac{1}{m}$	4,6 cm	1,75 cm	1,5 cm	1 : 3,057
	bis 7705 $\frac{1}{m}$	x 4,6 cm			
groß	17145 $\frac{1}{m}$	3,4 cm	1,75 cm	1,5 cm	1 : 2,48
	bis 17619 $\frac{1}{m}$	x 3,4 cm			

Tabelle 4.1.: Technische Daten der Kreuzspulenkästen

Insgesamt standen für die Diplomarbeit drei verschiedene Kreuzspulenkästen zur Verfügung. Diese wurden aus einer vorigen Diplomarbeit übernommen [16]. Diese drei Kreuzspulenkästen unterscheiden sich im Aufbau der Spulen, in der Geometrie innerhalb des Kreuzspulenkastens und hinsichtlich der Höhe ihrer erzeugten Feldstärke. Die folgende Tabelle (4.1) gibt einen Überblick über die Spulenarten, die magnetische Feldstärke der einzelnen Kreuzspulenkästen über die Abmessungen innerhalb des Spulenraumes, sowie das Verhältnis des einzelnen Spulenkastens zu einer idealen Helmholtzspulen-Anordnung.

Die Namensgebung der Kreuzspulenkästen erfolgte unter Berücksichtigung der Spulenfaktoren. Die Spulenfaktoren wurden aus der Diplomarbeit [16] übernommen (ohne genauere Überprüfung der Angaben). Mit dem angegebenen Messraum ist der Raum zwischen den Spulenköpfen gemeint, welcher theoretisch komplett genutzt werden könnte um den Winkelsensor zu platzieren. Mit dem Spulenradius und der Spulentiefe sind baubedingte Größen der Spulen gemeint. Diese Größen ergeben sich aus der gemessenen halben Tiefe einer Spule und dem gemessenen Außenradius minus des Innenradius des Spulenkerne. Die Differenz der beiden Radien halbiert, ergibt den mittleren Spulenradius, die halbe Tiefe einer Spule die rechnerische mittlere Spulentiefe. Diese Annahmen sind wichtig, da die Spule theoretisch auf eine einzige Windung reduziert wird. Diese Windung liegt dann an den angegebenen Werten des mittleren Spulenradius und der mittleren Spulentiefe. Das angegebene Verhältnis aus Tabelle (4.1) errechnet sich wie folgt: die Gesamtstrecke zwischen den Spulen muss ermittelt werden aus dem Mittel der Spulentiefe $t_{1/2}$ und dem Abstand der Spulenköpfe A .

$$A_{gesamt} = t_{1/2} + A \quad (4.2)$$

Danach muss die Gesamtstrecke in das Verhältnis zum mittleren Radius r_M gebracht werden.

$$Verhaeltnis = \frac{r_M}{A_{gesamt}} \quad (4.3)$$

Wie bereits erwähnt, müsste der ideale Abstand gleich dem mittleren Spulenradius sein. Wie aber in Tabelle (4.1) deutlich zu sehen ist, liegen alle Spulenkästen weit über dieser Forderung. Nämlich um das maximal 3,7-fache darüber.

Eine weitere wichtige Anforderung an den Kreuzspulenkasten ist die Größe des magnetischen Feldes. Die Stärke des magnetischen Feldes muss an der Messposition für den Sensor mindestens $25 \frac{kA}{m}$ betragen. Wie aus Tabelle (4.1) ersehen werden kann würde das für den kleinen Kreuzspulenkasten eine Stromstärke von ca. $13,7 A$ bedeuten. Ein Strom solcher Größenordnung würde aber einen viel zu hohen Erwärmungsgrad der Spulen nach sich ziehen und ist somit nicht vertretbar. Beim mittleren Kreuzspulenkasten würde noch ein Strom von $3,25 A$ nötig sein, um die Mindestanforderung von $25 \frac{kA}{m}$ magnetischer Feldstärke zu erreichen. Außerdem sorgt schon ein Strom von knapp $3 A$ für einen zu hohen Erwärmungsgrad, dem die Spulen dauerhaft nur schwer aushalten könnten, ohne Beschädigungen davon zu tragen.

Bleibt als letzte Alternative nur noch der große Kreuzspulenkasten. Hier wird nur ein Strom von $1,44 A$ benötigt um das nötige Minimum an magnetischer Feldstärke zu erzeugen. Da dieser Strom eine vertretbare Wärmeentwicklung zur Folge hat, spielt bei den folgenden Betrachtungen nur noch der große Spulenkasten eine Rolle. Der benötigte Spulenstrom I_{Spule} läßt sich wie folgt errechnen:

$$I_{Spule} = \frac{H_{Spule}}{Spulenfaktor} \quad (4.4)$$

Der resultierende Spulenstrom muss aber in der Praxis etwas größer sein als der errechnete Spulenstrom. Der Grund hierfür liegt in der Verteilung der magnetischen Feldstärke auf den Spulenachsen. Das erzeugte Maximum liegt nicht in der Mitte der Spulen sondern direkt an den Spulenköpfen. Deshalb muss der Strom zur Erzeugung der Mindestfeldstärke etwas überschritten werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Erhöhung um 57 Prozent, auf $2,27 A$, in Bezug auf die Stärke des magnetischen Feldes und der eintretenden Wärmeentwicklung, am geeignetsten ist. Die Verteilung der magnetischen Feldstärke ist in Bild (4.2) zu sehen.

4.3. Das magnetische Feld im Kreuzspulenkasten

Um sicher zu stellen, dass sich trotz der veränderten Anordnung im Kreuzspulenkasten ein Bereich mit hoher Homogenität und hoher Feldstärke bildet, wurde der große Kreuzspulenkasten mittels dem Programm femm 4.2 simuliert. Das Programm femm 4.2 benutzt die Finite-Elemente-Methode, um vorher gezeichnete Anordnungen von Spulen, Magneten

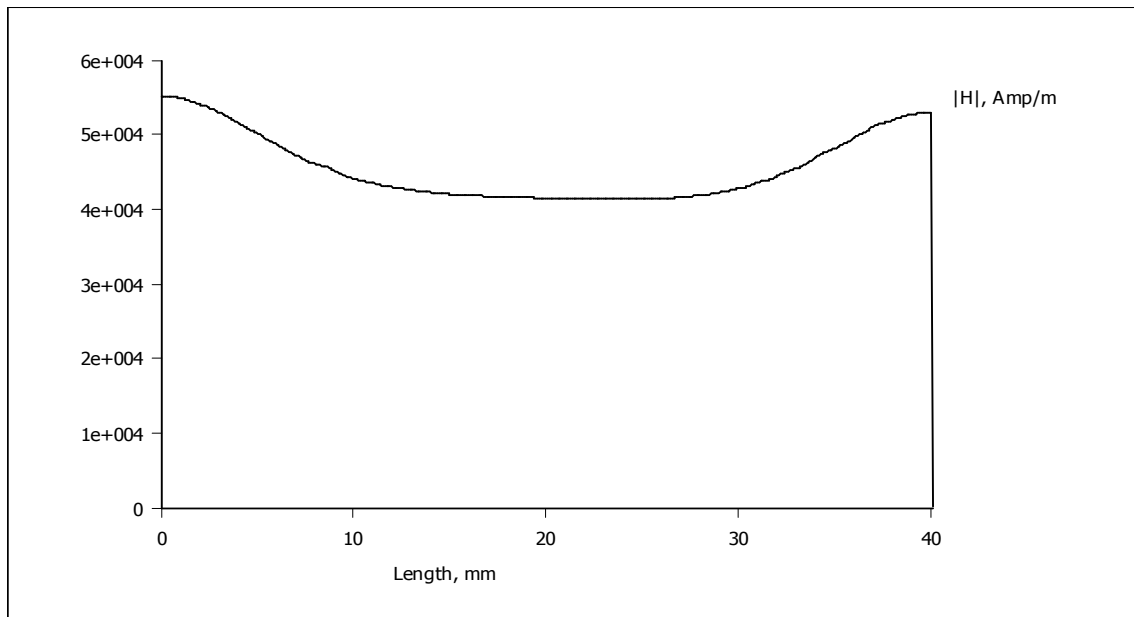


Bild 4.2.: Verteilung der magnetischen Feldstärke H auf den Spulenachsen

und anderen Teilen eines magnetischen Kreises, zu simulieren und Feldstärkeverläufe und Feldlinienverteilung darzustellen. Das Bild (A.1) im Anhang, zeigt den gezeichneten großen Kreuzspulenkasten. Bild (4.3) zeigt die Verteilung der Feldlinien in einem Ausschnitt um den Mittelpunkt des Kreuzspulenkastens.

Aus der Simulation ist zu erkennen, dass im geometrischen Mittelpunkt des Kreuzspulenkastens ein Bereich existiert, in dem die magnetische Feldstärke höher liegt als die für den Versuchsaufbau geforderten $25 \frac{kA}{m}$, nachgewiesen wurde dies durch eine Messung mit einem Gaussmeter. Das Ergebnis zeigt Bild (4.4). Der Gradient des Verlaufs der Feldlinien ist im Bereich um die geometrische Mitte ebenfalls sehr klein. Beides sind gute Voraussetzungen für eine genaue Winkelmessung (vgl. Kapitel 3.4) Bild (4.2) zeigt die simulierte Verteilung der magnetischen Feldstärke auf den Achsen zwischen zwei Spulen. Deutlich ist hier zu sehen, dass der maximale Wert von H sich direkt an den Spulenköpfen befindet. Es folgt eine Senke, welche annähernd eben ist, gefolgt von einem weiteren Anstieg zum Spulenkopf der zweiten Spule auf der Achse. Der Verlauf der magnetischen Feldstärke H lässt sich mit Formel (5.6) berechnen. Es ist zu beachten, dass die magnetische Feldstärke eine vektorielle Addition beider Feldkomponenten an einem Punkt ist. Formel (5.6) muss also für jeden Punkt auf der Achse und für jede Spule separat angewandt werden, dieses Ergebnis ist dann vektoriell zu addieren.

Um einen besseren Einblick in die Feldstärkenverteilung zu bekommen, wurde der Großfeld-

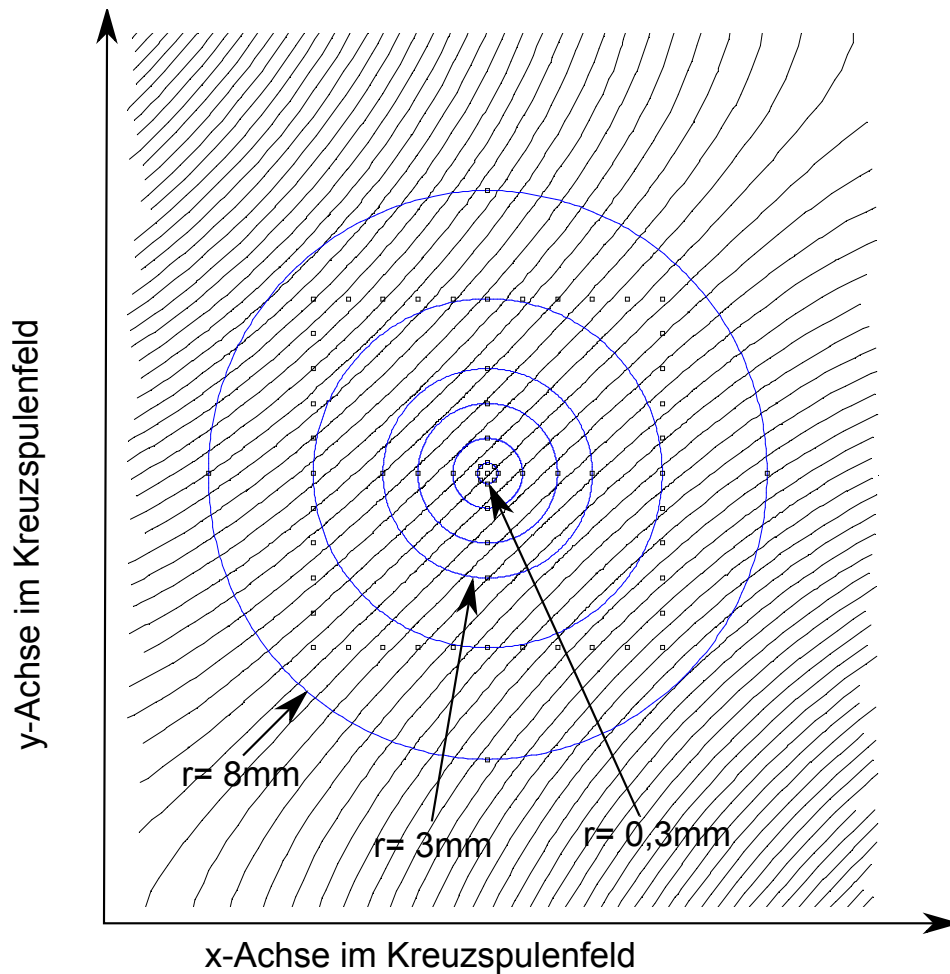


Bild 4.3.: Ausschnitt aus dem Großfeldkasten, mit Feldlinienverlauf. Darstellung durch femm4.2

kasten mit einem Gauss-Meter vermessen. Bild (4.4) zeigt das Ergebnis dieser Messung. Zu sehen ist die magnetische Feldstärke in $\frac{kA}{m}$ und die vorherrschende magnetische Feldausrichtung. Deutlich zu erkennen ist, dass die Feldausrichtung inhomogen ist. Besonders im Randbereich, in der Nähe der Spulenköpfe, tritt dieses deutlich hervor.

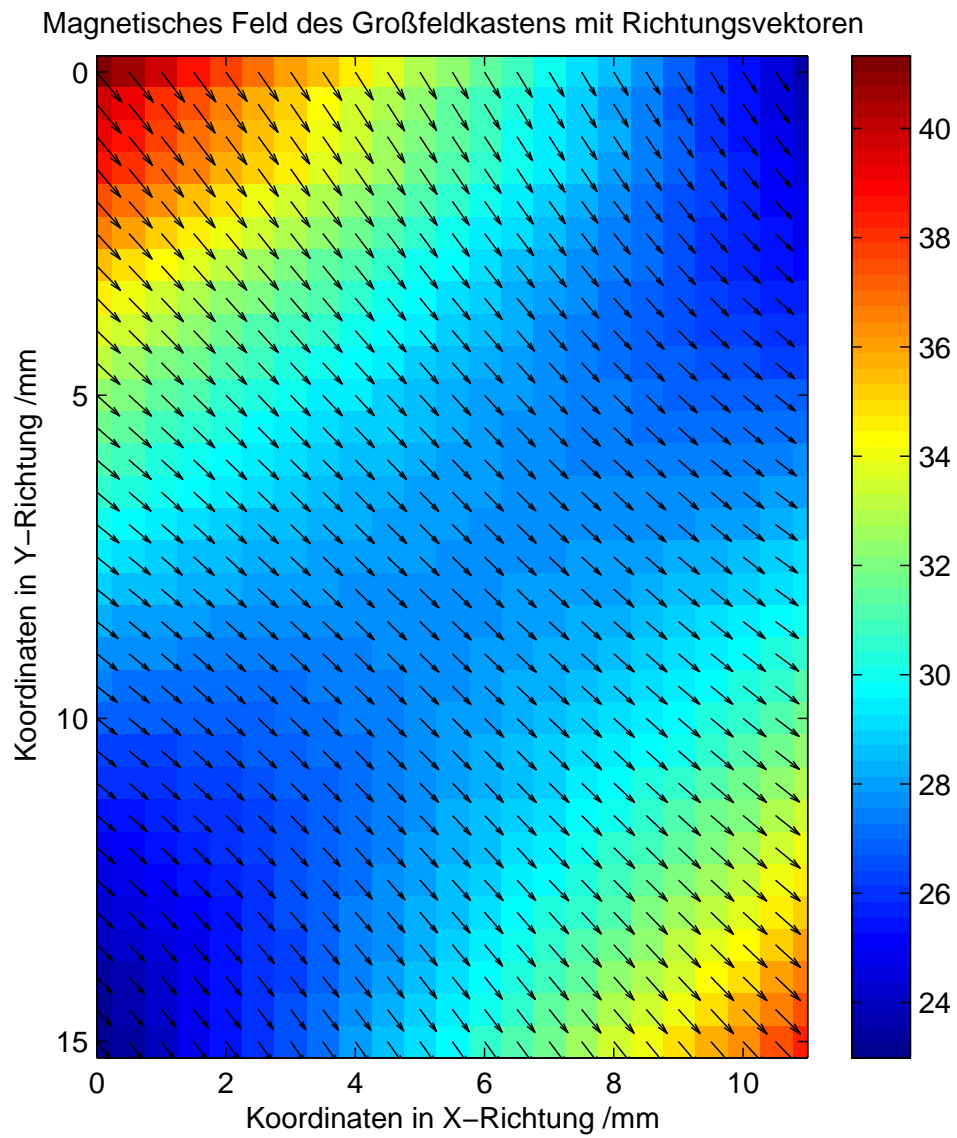


Bild 4.4.: Messung der Feldstärke im Großfeldkasten. Farbe kodiert die magnetische Feldstärke in kA/m

4.4. Inhomogenitäten im magnetischen Feld

Die Simulationsergebnisse zeigen innerhalb des Kreuzspulenkastens Bereiche mit guten Voraussetzungen für eine Winkelmessung mit dem Winkelsensor und leider auch Gebiete mit Attributen, welche es nicht erlauben, dort vernünftige Winkelmessungen vorzunehmen. Die Bereiche mit guten Eigenschaften befinden sich, wie bereits erwähnt, im Zentrum des Kreuzspulenkastens. Je weiter man nun in Richtung Rand, also zu den Spulen hin wandert, desto schwieriger werden die Umgebungsverhältnisse für vernünftige Winkelmessungen. Kurz zusammengefasst kann man sagen, dass es in der Nähe vom Zentrum einen großen Gradienten im Feldlinienverlauf gibt und ein gleichmäßiges Niveau im Verlauf der magnetischen Feldstärke H . Mit Fortschreiten in Richtung der Spulenköpfe wird der Gradient der Feldlinien immer kleiner. Die magnetische Feldstärke H wird erst langsam einen Anstieg erfahren und kurz vor den Spulenköpfen einen fast exponentiellen Anstieg aufzeigen.

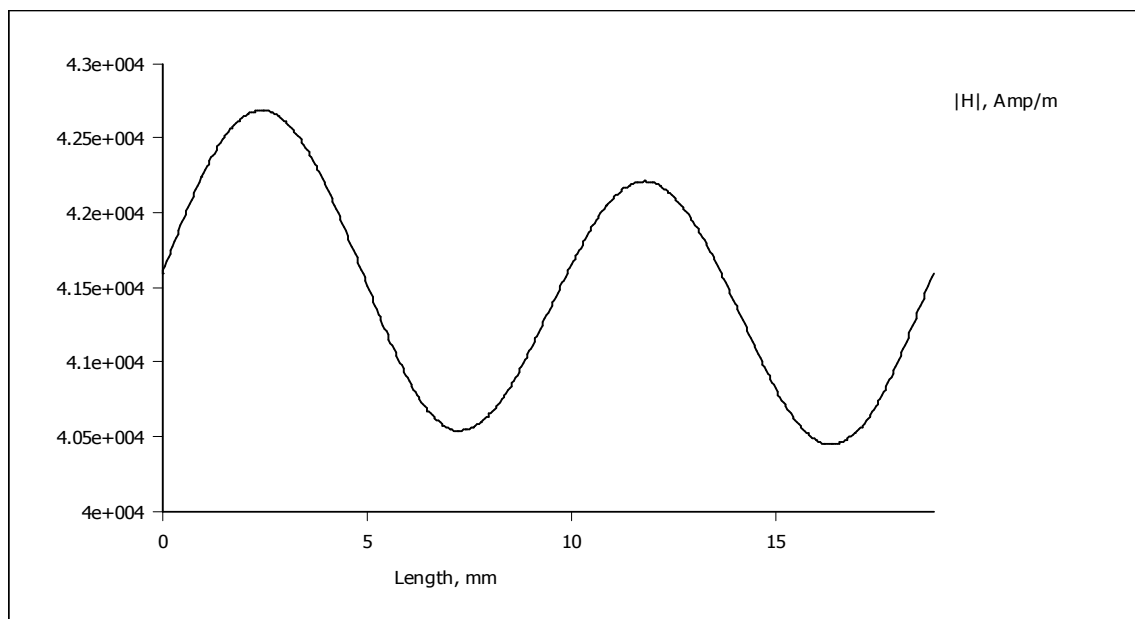


Bild 4.5.: Verlauf der magnetischen Feldstärke auf einem Radius von $r=3\text{mm}$ um den Achsenmittelpunkt

Schaut man sich den Verlauf der magnetischen Feldstärke H im Mittelpunkt an (der idealen Sensorposition), hat man dort einen Bereich an dem der Gradient der Feldlinien groß ist und H konstant. Geht man nun auf einem Radius weg von diesem Mittelpunkt und beginnt außerdem um diesen Mittelpunkt zu rotieren, entstehen Kreise. Der Umfang der Kreise richtet sich nach der Entfernung vom Mittelpunkt, dem Radius. Betrachtet man nun auf dem so entstandenen Umfang die magnetische Feldstärke H , wird man folgende Beobachtung

machen: Je weiter man sich vom Mittelpunkt entfernt, desto mehr schwankt die magnetische Feldstärke. Es entsteht quasi eine Art Sinusschwingung. Die Amplitudenhöhe dieser Schwingung ist direkt abhängig von der Entfernung vom Mittelpunkt. Zusätzlich verschiebt sich der Nulldurchgang dieser Schwingung analog zur bereits beschriebenen Feldstärkeverteilung aus Bild (4.5). Das bedeutet, die Feldstärke um die diese Schwingung stattfindet, variiert je nach Entfernung zu den Spulenköpfen

Die genaue mathematische Beschreibung dieser Schwingung der magnetischen Feldstärke hängt mit einer Betrachtung der Feldstärke zwischen den Spulen aber außerhalb der Achse zusammen. Als Ansatz für diese Betrachtung muss man auf Bessel-Funktionen¹ [3] zurückgreifen. Ein Problem stellen diese Schwankungen in der magnetischen Feldstärke dann dar, wenn der geforderte Wert von $25 \frac{kA}{m}$ unterschritten wird. Diese Schwankungen in der Feldstärke wurden simuliert und sind in Bild (4.5) dargestellt. Deutlich sind hier die Schwankungen in der Feldstärke zu sehen. Tabelle (4.2) gibt eine Übersicht über die Höhe der Schwankungen in Abhängigkeit vom Radius.

Radius [mm]	maximaler Betrag $ H [\frac{kA}{m}]$	Amplitude [$\frac{kA}{m}$]	Amplitude [Prozent]
0,3	41,5	0	0
1	41,8	0,3	0,7
2	42	1	2,4
3	42,5	2	4,7
5	44,5	5,5	12,36
6	49	10	28,58

Tabelle 4.2.: Schwankungen der Feldstärke in Abhängigkeit eines Radius um den Mittelpunkt

Würde man die Simulationsergebnisse auf den realen Kreuzspulenkasten übertragen, kann es passieren, dass man ab einer Abweichung von 3 mm schon unter die geforderten $25 \frac{kA}{m}$ magnetische Feldstärke gelangt. Selbst bei einer idealen Positionierung des Winkelsensors sorgt die Fläche der Messbrücke mit 1,1 mm x 1,1 mm schon für eine Schwankung der Feldstärke von knapp einem Prozent.

¹Die Besselsche Differentialgleichung stellt den radialen Anteil der Laplace-Gleichung bei zylindrischer Symmetrie dar. Sie findet unter anderen Anwendung in der Untersuchung der Eigenschwingung einer kreisförmigen Membran und der Feldverteilung bei Rundleitern

5. Positionsbestimmung

In diesem Kapitel sollen die theoretischen Möglichkeiten zur Positionsbestimmung des Winkelsensors im magnetischen Feld des Kreuzspulenkastens erläutert werden. In diesem Zusammenhang ist die Frage wichtig, wo sich ein homogener Bereich innerhalb des Kreuzspulenkastens befindet und wie man diesen Bereich am besten ausfindig macht. Als bestes Hilfsmittel erweist sich hier die Abhängigkeit der einzelnen Brückenausgangsspannungen, V_{out1} und V_{out2} , von magnetischen Bereichen mit niedrigem Gradienten. Wie bereits in Kapitel (3) beschrieben wurde, ändern sich die sinusförmigen Brückenausgangsspannungen je nach dem Gradienten des umgebenden magnetischen Feldes. Ist das magnetische Feld mit einem hohem Gradienten behaftet, verändern sich die Sinussignale der Brückenausgangsspannungen so, dass es zu Verformungen und somit zu Abweichungen von einer idealen Sinuskurve kommt. In dem folgenden Kapitel wird erläutert, welche Methoden der Positionsbestimmung benutzt worden sind.

5.1. Lissajous-Abgleich

Lissajous-Figuren sind benannt nach dem französischen Physiker Jules Antoine Lissajous (1822 - 1880) [5]. Diese Figuren entstehen durch die Überlagerung von harmonischen Schwingungen. Bei Lissajous-Figuren handelt es sich also um Schaubilder von Funktionen. Die Funktionen müssen der Form:

$$x(t) = A_x \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \phi_1) \quad (5.1)$$

$$y(t) = A_y \cdot \sin(\omega_2 \cdot t + \phi_2) \quad (5.2)$$

entsprechen.

Wenn das Frequenzverhältnis $\nu = \omega_1/\omega_2$ rational wird, entstehen geschlossene Kurven. Die genaue Form der resultierenden Kurven bestimmt das Frequenzverhältnis und die Phasendifferenz. Sind Frequenzverhältnis und Phasendifferenz bekannt, kann man daraus auf die endgültige Form der entstehenden Lissajous-Figur schließen. Beispiele hierzu findet man in dem Bild (5.1) .

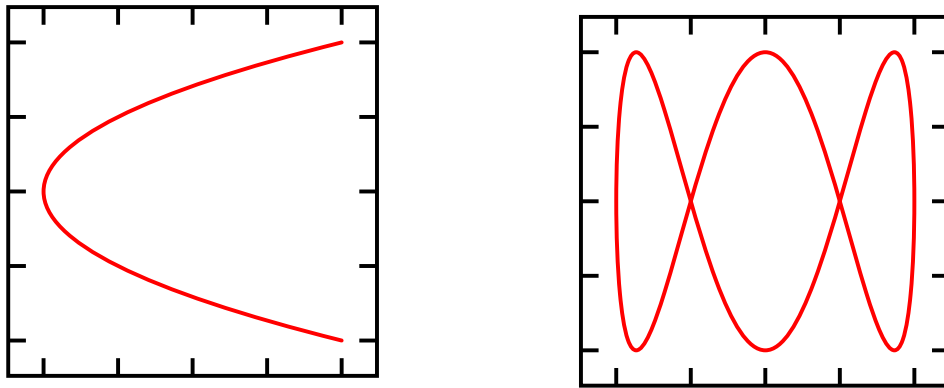


Bild 5.1.: Lissajous-Figuren. Links ist eine Lissajous-Figur dargestellt wie man sie bei einem Frequenzverhältnis von 2:1 erwarten kann (das zu erwartende Verhältnis von Sensorsignal zu Anregung Kreuzspulenkasten). Rechts ein Beispiel für Frequenzverhältnis von 3:1. [5]

Auf Grund der Brückenausgangssignale des Winkelsensors, kann man auf eine Lissajous-Figur in der Form des Bildes (5.1 links) schließen. Das Frequenzverhältnis erhält man durch die Kenntnis der Anregung im Kreuzspulenkasten und der Antwortfunktion des Winkelsensors. Der Winkelsensor antwortet auf eine Umdrehung des äußeren magnetischen Feldes mit zwei vollen Umdrehungen (Verhältnis 2:1). Wenn z.B. das magnetische Feld im Kreuzspulenkasten mit 2 Hz rotiert wird der Winkelsensor daraus eine 4 Hz Antwort-Funktion machen. Die Phasenverschiebung wurde mittels einer Messung mit dem Oszilloskop auf $\phi = \frac{\pi}{2}$ festgestellt. Hieraus ergibt sich das in Bild (5.1 links) gezeigte Schaubild. Rechnerisch ergeben sich diese Schaubilder indem man die Funktion aus Gleichung (5.1) an eine X-Achse gibt und die Funktion aus Gleichung (5.2) an eine Y-Achse. Nun muss für jeden Zeitpunkt t der Wert der X-Achse und der entsprechende Wert der Y-Achse ermittelt werden. Die augenblicklichen Amplitudenwerte ergeben den Koordinatenwert in einem XY-Diagramm. Dies geschieht dann für eine komplette Periode 2π . Siehe zum besseren Verständnis Bild (5.2). Dieses Verfahren wird in der Regel mit Oszilloskopen umgesetzt.

Diese Art der Positionsbestimmung erwies sich leider als ungeeignet. Mit dieser Methode ist es schwer ersichtlich, ob überhaupt eine Veränderung der Brückenausgangsspannung aufgetreten ist. Da die Lissajous-Figur ja aus 2 Funktionen getrennt gebildet wird und sich im vorliegenden Fall eine Funktion, nämlich die Anregung des Kreuzspulenkastens, gar nicht verändert. Bei der Funktion des Winkelsensors ändert sich je nach Position im magnetischen Feld aber die Phase und der Sinusverlauf. Dieser wird nur an einer Stelle mit kleinem Gradienten einer Sinusfunktion entsprechen. An Stellen mit hohem Gradienten aber wird sich die Sinusfunktion verformen. Das heißt, es treten außer der ersten Harmonischen noch mehrere weitere Harmonische auf, welche für eine derartige Verformung verantwortlich sind.

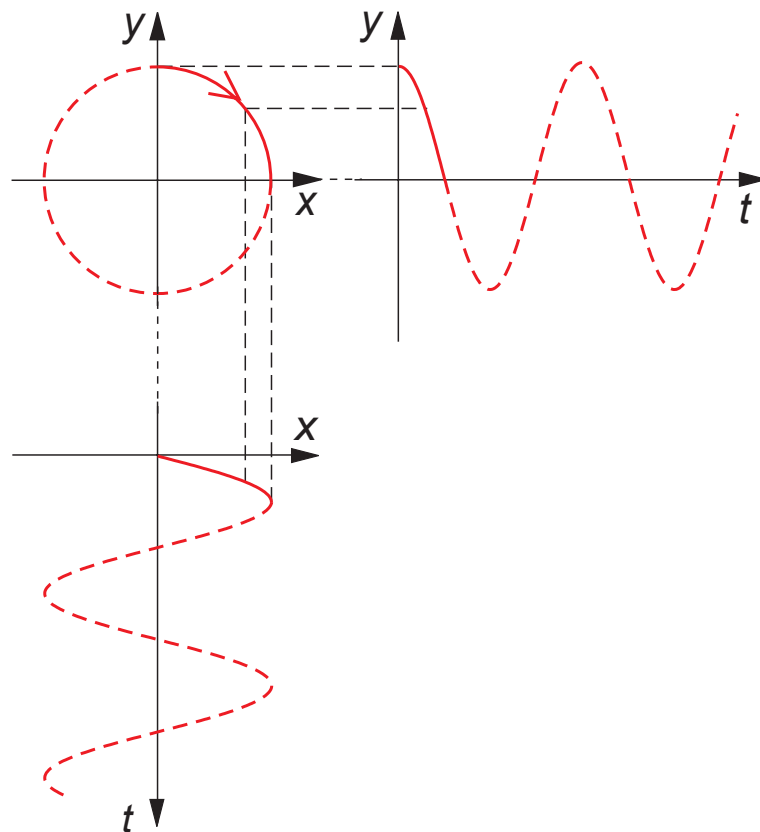


Bild 5.2.: Beispiel für die Konstruktion einer Lissajous-Figur [5]

Wichtig ist in einem Lissajous-Abgleich aber auch die Phasenverschiebung zwischen den beiden Funktionen. Ist diese für alle Zeitpunkte t gleich, kann man sich auf eine bestimmte Lissajous-Figur einstellen. Da sich aber auf Grund der Änderung des Gradienten auch die Phasenverschiebung ändert, muss man von ständig neuen Lissajous-Figuren ausgehen, auf die ein Abgleich erfolgen muss. Daher ist die unmittelbare Kenntnis vom Phasenwinkel und reinem Sinusverlauf an der homogensten Stelle des magnetischen Feldes unabdingbar. Da man aber zu Beginn der Messung höchstens erraten kann, wo sich diese Stelle mit niedrigem Gradienten befindet, lässt sich mit dieser Methode nur bestimmen, ob der Sensor weit weg ist von dem Teil des magnetischen Feldes mit niedrigem Gradienten. Eine genaue Aussage über die richtige Position des Winkelsensors ist mit dem Lissajous-Abgleich leider nicht möglich.

5.2. Positionsbestimmung im rotierenden Feld

Da die Verformung des Sinussignals der einzelnen Brückenausgangsspannungen eine Aussage über die Position im magnetischen Feld treffen kann, kam die Idee einer Klirrfaktor¹-Positionsbestimmung auf. Hierbei werden die beiden Ausgangssignale, V_{out1} und V_{out2} des Winkelsensors auf ihre Harmonischenanteile geprüft. In der Theorie müsste an einer Stelle mit kleinem Gradienten im Magnetfeld der Anteil aller Harmonischen, bis auf die 1. Harmonische², Null sein. Das bedeutet, nur die 1. Harmonische eines sinusförmigen Signals wird nachzuweisen sein.

$$k = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \quad (5.3)$$

Formel (5.3) beschreibt die Klirrfaktorberechnung. Dabei steht U_1 für die 1. Harmonische des Signals. Die Spannungen U_2 bis U_n stehen für die weiteren vorhandenen Harmonischen. Als Ergebnis kommt ein Verhältnis heraus. Das Verhältnis stellt die Summe aller Harmonischen ohne die 1. Harmonische, zur Summe aller Harmonischen mit der 1. Harmonischen dar. Um aus dem Verhältnis einen Prozentwert zu bekommen, muss der Klirrfaktor mal 100 genommen werden.

Üblicherweise beschreibt der Klirrfaktor und somit die Formel (5.3) Harmonischenanteile an Zeitsignalen der Form $U = f(t)$. In dieser Diplomarbeit sind die aufgenommenen sinusförmigen Signale aber nicht zeitabhängig, sondern erhalten ihre Form auf Grund einer Winkeländerung. Es müssen also Harmonischenanteile von Signalen der Form $U = f(\alpha)$ untersucht werden. Formal muss deshalb angemerkt werden, dass $U = f(t) = f(\alpha)$ ist. Es werden in der Diplomarbeit also keine Zeitsignale, sondern Signale die eine Winkelabhängigkeit besitzen beschrieben

Ein Klirrfaktor von 0 Prozent beschreibt, dass es sich um die reine 1. Harmonische ohne weitere Anteile anderer Harmonischen handelt. Bei einem entsprechenden Klirrfaktor von 10 Prozent würde der Harmonischenanteil (ab 2. Harmonische aufwärts) genau diese 10 Prozent am Signal betragen. Die jeweiligen Harmonischen ermittelt man mittels einer Fourier-Analyse. Im vorliegenden Fall wird hierzu eine DFT (diskrete Fourier Transformation) verwendet. Hierbei handelt es sich um die Fourier-Transformation eines zeitdiskreten Signals. Die zu analysierenden Signale sind die Ausgangssignale der Winkelsensorhalbbrücken V_{out1} und

¹im deutschen Klirrfaktor, im englischen Harmonic Distortion (HD)

²Alternativ zur 1. Harmonischen kann man auch Grundschwingung sagen. Demnach wäre dann die 2. Harmonische die 1. Oberwelle der Grundschwingung und die 3. Harmonische die 2. Oberwelle.

V_{out2} . Die Signale sind deshalb mittels DFT zu behandeln, da sie über ein digitales Speicheroszilloskop erfasst werden, welches uns ein zeitdiskretes Signal liefert. Im Vergleich zur FFT verlangt die DFT aber keine bestimmte Anzahl an Abtastwerten. Eine FFT verlangt eine 2^n große Anzahl an Werten. In Formel (5.4) ist die Fourier Transformation eines kontinuierlichen Signals und in Formel (5.5) [6] ist die diskrete Fourier Transformation eines zeitdiskreten Signals dargestellt.

$$F\{f(t)\} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int f(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (5.4)$$

$$DFT\{x(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} (x(k) \cdot W_N^{kn}) \quad (5.5)$$

In Formel (5.5) wurde der komplexe Drehoperator

$$W_N = e^{-j2\pi/N}$$

verwendet.

Wie bereits im Kapitel (3) über Winkelsensoren erwähnt wurde, werden die Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} reine Sinussignale ohne Harmonischenanteile sein, wenn sich der Sensor in einem ausreichend starken magnetischen Feld mit kleinem Gradienten befindet. Idealerweise würde an einer solchen Stelle im magnetischen Feld der Klirrfaktor 0 Prozent betragen. Doch schon herstellungsbedingt ergeben sich störende Einflüsse auf die Brückenausgangssignale. So kann man im Idealfall von einem Klirrfaktor von ca. 0,2 bis 0,3 Prozent ausgehen, dieses entspricht in etwa -53dB bis -60dB³. Im Anhang (Bild A.3 und A.4) befinden sich grafische Resultate der Klirrfaktor-Messungen. Die Abbildungen (5.4) und (5.5) zeigen, wie sich der Signalverlauf der Brückenausgangsspannungen in Abhängigkeit von der Feldstärke und dem Gradienten des magnetischen Feldes verändert. Die Abbildungen (5.4) und (5.5) zeigen also Messpositionen mit hohem Klirrfaktor (schlechte Messposition) und niedrigem Klirrfaktor (gute Messposition).

Voraussetzung für diese Art der Positionsbestimmung ist, dass man eine genügende Menge an Perioden der Brückenausgangssignale zur Berechnung des Klirrfaktors hat. Ein guter Wert hierfür wären 10 Perioden und mehr. Nur so kann sicher gestellt werden, dass eventuelle störende Einflüsse, wie z.B. Einschwingvorgänge, Verfahren der Achsen oder Beschleunigungsvorgänge des Drehmesstisches keinen Einfluss auf die Klirrfaktor-Berechnung haben. Da also eine große Anzahl an Perioden benötigt wird, wird das rotierende magne-

³Die Umrechnung von Prozent in Dezibel erfolgt mittels $[dB] = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)$

tische Feld im Kreuzspulenkasten während der Klirrfaktor-Positionsbestimmung um den Sensor durch einen Funktionsgenerator mit angeschlossenen Leistungsverstärkern erzeugt.

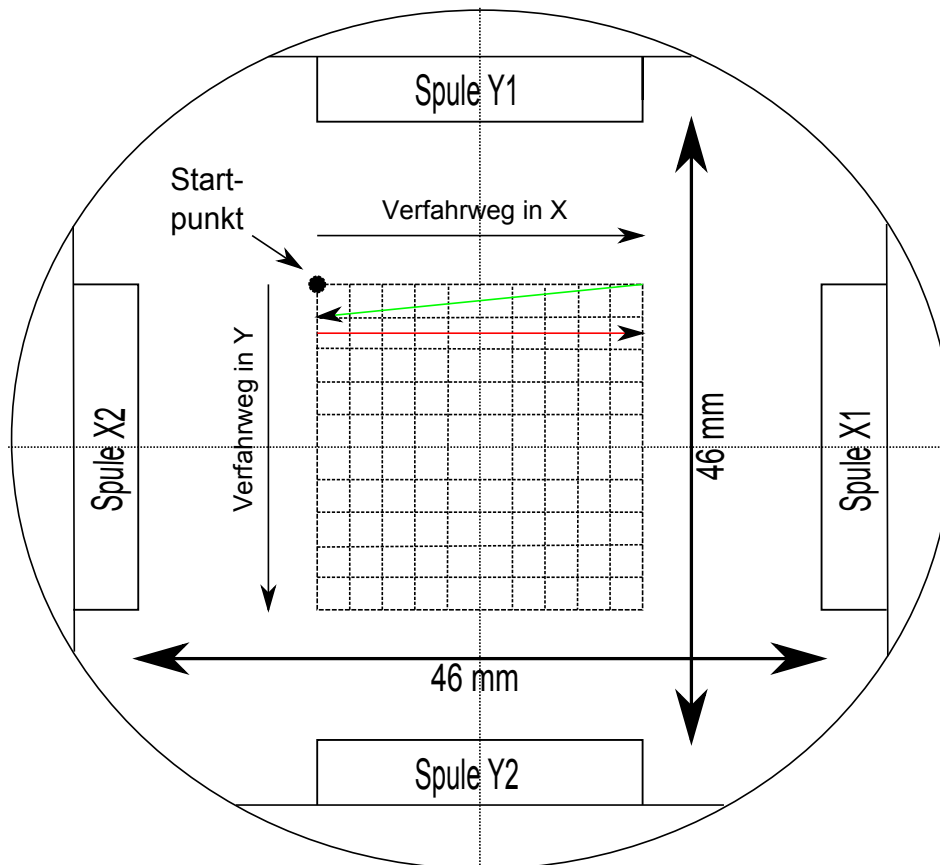


Bild 5.3.: Schematische Draufsicht auf den Großfeldkasten. Zu sehen ist die Bezeichnung der Achsen und wie bei der Bestimmung der Messposition verfahren wird.

Die Durchführung einer Klirrfaktor-Messung gestaltet sich wie folgt: Man unterteilt den Kreuzspulenkasten in ein Gitterfeld und fährt die einzelnen Punkte dieses Gitters an. Das Gitterfeld versucht man gleichmäßig um den geometrischen Mittelpunkt der Spulenpaare zu legen, also genau mittig im Spulenkasten. Jedem Messpunkt kann auf diese Weise ein Klirrfaktor zugewiesen werden. Bei einer guten Einbauposition des Sensors innerhalb des Magnetfeldes würde sich ein Bereich ausbilden, in dem der Klirrfaktor sehr klein ist. Idealerweise würde der Klirrfaktor an dieser Position Null sein. Würde man dann das gesamte Messgitter betrachten, würde man den Eindruck bekommen es handelt sich um einen Trichter. Trichter deshalb, weil an der Messposition ein kleiner Klirrfaktor vorhanden ist. In der Nähe der Spulenenden würde es zu einem hohen Klirrfaktor kommen, da hier die störenden Einflüsse des hohen Gradienten des Feldes zu groß sind. Bild (5.4 und 5.5) zeigt

eine solche Klirrfaktormessung. Ein weiterer störender Einfluss stellt die Verkippung des Winkelsensors dar. An der idealen Messposition würde sich also ein Trichter ausbilden, da hier der Klirrfaktor der Sensorsignale annähernd ideal sinusförmig ist. Im Anhang zeigt Bild (A.3 und A.4) eine Klirrfaktor-Messreihe mit verkipptem Sensor.

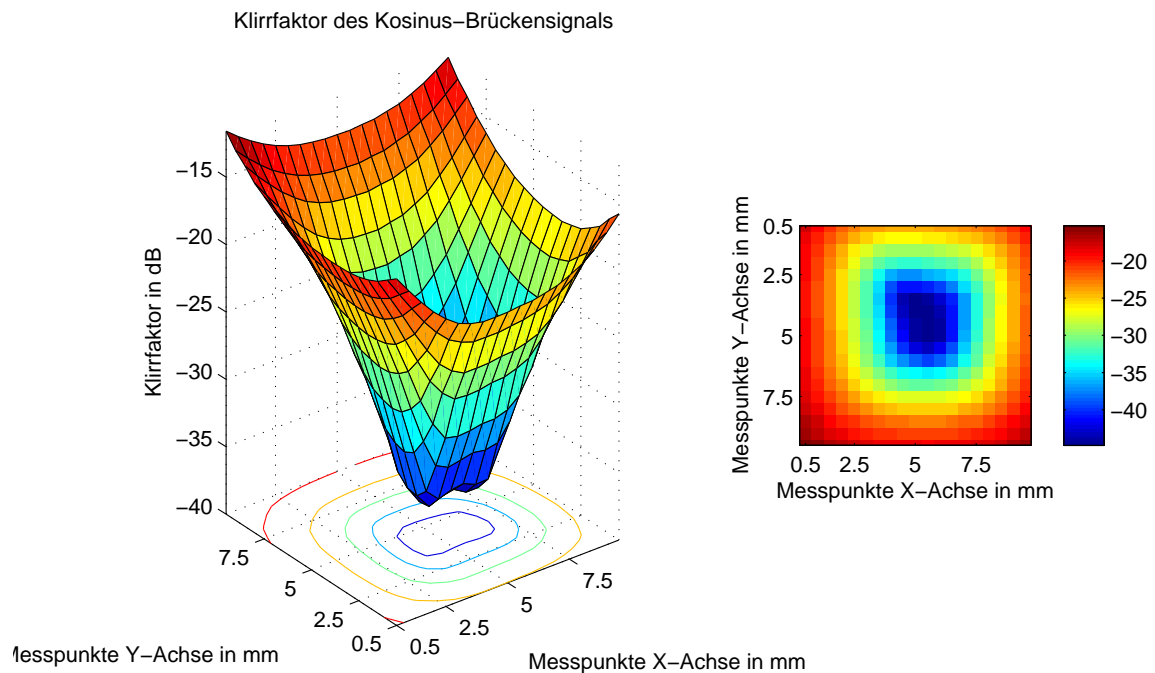


Bild 5.4.: Kosinus-Messbrücke (V_{out1}) Ergebnis einer Suche nach der Messposition mittels elektrischen Drehens. Zu erkennen ist die Trichterform des Klirrfaktors. Farblich codiert ist der dB-Wert des Klirrfaktors dargestellt.

Bei der Klirrfaktor-Messreihe mit Verkippung des Winkelsensors ist deutlich ein Doppeltrichter zu erkennen. Doppeltrichter bedeutet, dass sich anstelle eines Minimums im Klirrfaktor zwei Minima gebildet haben. Dieser Doppeltrichter bildet sich auf Grund der Verkippung aus. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich bei Verkippung einzelne Messbrücken des Winkelsensors unterschiedlich stark vom magnetischen Feld in ihrem Widerstandsverhalten beeinflussen lassen. Dadurch kommt es um die beste Messposition herum zu den beiden gezeigten Doppeltrichtern. Im Bild (5.5) ist dieser Trichter verschwunden und einem einzelnen Trichter gewichen, welcher die gefundene Messposition für die folgenden Winkelmessungen darstellt. Dieser Vorgang der Positionierung muss immer dann durchgeführt werden, wenn:

- ein Winkelsensor gewechselt wird,
- der Spulenkasten gewechselt wird,

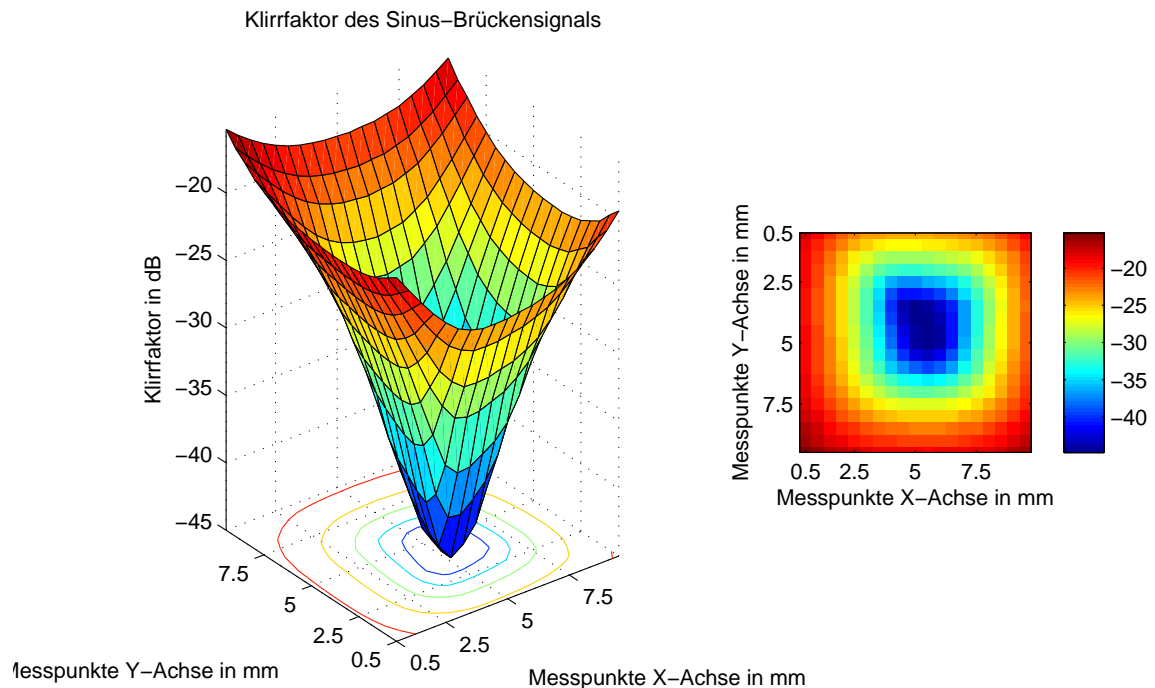


Bild 5.5.: Sinus-Messbrücke (V_{out2}) Ergebnis einer Suche nach der Messposition mittels elektrischen Drehens. Farblich codiert ist der dB-Wert des Klirrfaktors dargestellt.

- die Messposition nicht eindeutig wieder gefunden werden kann.

5.2.1. Erzeugung eines rotierenden magnetischen Feldes

Zur Erzeugung eines rotierenden magnetischen Feldes werden die Spulen der X-Achse und der Y-Achse mittels eines Funktionsgenerators auf unterschiedliche Arten mit Strom versorgt. Als erstes werden die zwei Spulen der X-Achse und der Y-Achse zu Spulenpaaren mit gleichem Stromfluss parallel zusammen geschaltet. Dann werden die entstandenen Spulenpaare mit unterschiedlichen Wechselströmen versorgt. Im Messaufbau wird das X-Achsen Spulenpaar mit einem Sinus-Wechselstrom gespeist, während das Y-Achsen Spulenpaar durch einen Kosinus-Wechselstrom gespeist wird. Dieser Effekt hat zur Folge, dass sich im Inneren des Kreuzspulenkastens ein rotierendes magnetisches Feld ausbildet. Die Drehrichtung ist abhängig von der Wechselstromversorgung der Spulenpaare und die Drehfrequenz ist abhängig von der Frequenz der Wechselstromversorgung.

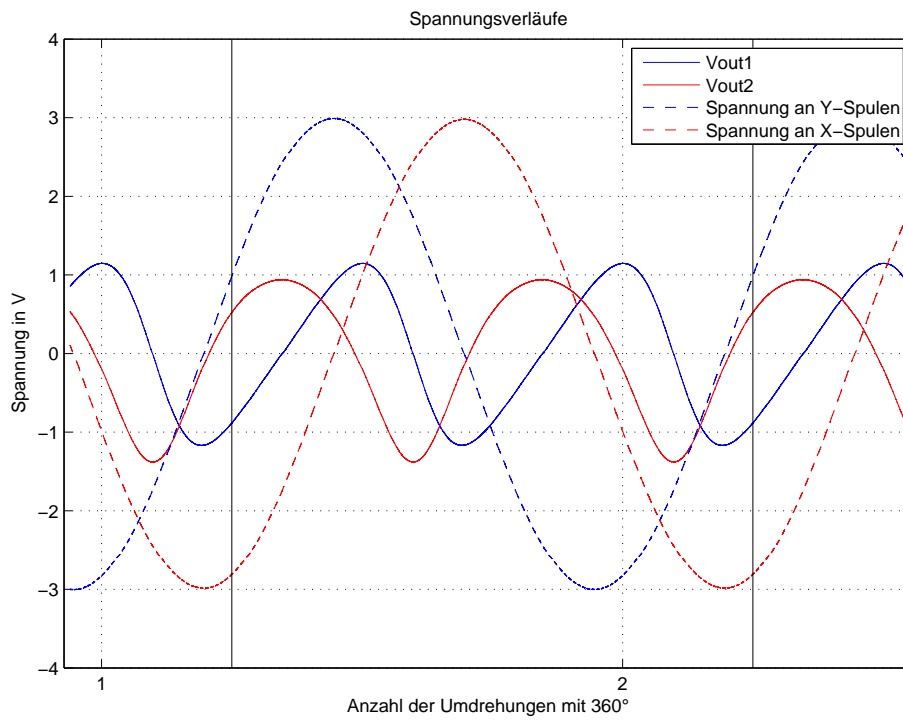


Bild 5.6.: Signalverlauf der Messbrücken an einer Position mit hohem Klirrfaktor-Wert.

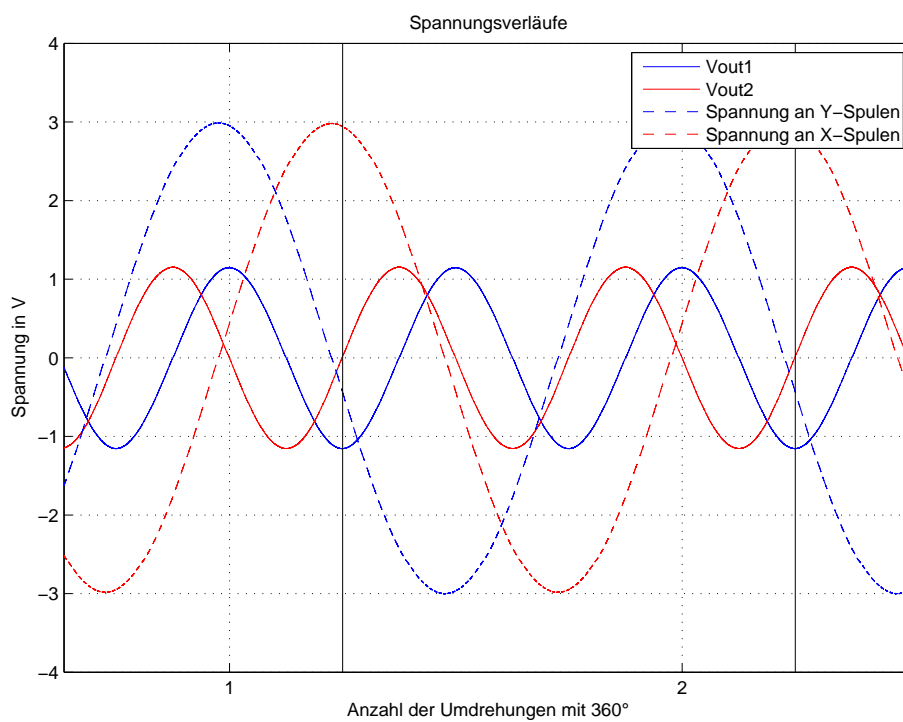


Bild 5.7.: Signalverlauf der Messbrücken an einer Position mit niedrigem Klirrfaktor-Wert.

5.3. Positionsbestimmung im statischen Feld

Die Positionsbestimmung im statischen Feld erfolgt auf eine einfachere Art, als bei der Positionsbestimmung im rotierenden magnetischen Feld. Bei der statischen Positionierung des Winkelsensors werden die Spulen der X-Achse und der Y-Achse gegenseitig bestromt. So kommt es, dass die magnetischen Feldstärken der einzelnen Spulen gegeneinander gerichtet sind. Bei dieser Art der Spulenansteuerung kommt es dann in einem bestimmten Abstand von den beiden Spulenden zu einem feldfreiem Raum. An dieser Stelle werden sich die Anteile der einzelnen Spulen an der magnetischen Feldstärke aufheben. Zur Veranschaulichung dient hier die Formel zur Berechnung der magnetischen Feldstärke im Raum zwischen den Spulen auf der Spulenchse eines Helmholtz-Spulenpaares [7].

$$\vec{H} = \vec{e}_z \cdot \frac{I}{4\pi} \oint \frac{ds \cdot a}{(a^2 + h^2) \cdot \sqrt{(a^2 + h^2)}}$$

Mit folgender Vereinfachung

$$\oint ds = 2\pi \cdot a$$

folgt für die Berechnung der magnetischen Feldstärke H die vereinfachte Form:

$$\vec{H} = \vec{e}_z \cdot \frac{I}{2} \cdot \frac{a^2}{(a^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.6)$$

Wendet man Formel (5.6) auf die Spulen einer Achse an, ist leicht zu erkennen, dass sich an der Stelle ein feldfreier Punkt bildet, an der die Beträge von H der beiden Spulen gleich sind. Andererseits ist auch zu erkennen, dass sich dieser Punkt nicht zwangsweise genau in der geometrischen Mitte auf der Achse zwischen den beiden Spulenden befinden muss. Dies ist der Fall wenn eine Spule zum Beispiel ein stärkeres magnetisches Feld erzeugt als die Spule auf dem anderen Ende der Spulenchse. Mit Hilfe des Winkelsensors kann man den feldfreien Raum ebenfalls detektieren. Dazu zeichnet man die Ausgangsspannungen V_{out1} und V_{out2} mittels eines digitalen Speicheroszilloskops, oder besser noch mit einem Digitalvoltmeter wegen der höheren Spannungsaufösung auf. Anschließend lässt sich auf Grund der Veränderung der Brückenausgangsspannungen erkennen, wo das Feld der einen Spule in das magnetische Feld der anderen auf dieser Achse befindlichen Spule übergeht. Bild (5.6) zeigt das Ergebnis einer solchen Mittelpunktssuche.

Erzeugt wurde dieses Bild, indem Messpunkte auf einem Messgitter angefahren wurden. Das gleiche Verfahren wird auch bei der Positionsbestimmung im elektrisch rotierenden Feld angewandt. Aufgenommen wurden die Brückenausgangsspannungen V_{out1} und V_{out2} . Mittels dieser Spannungen kann man erkennen, wie sich das magnetische Feld verhält.

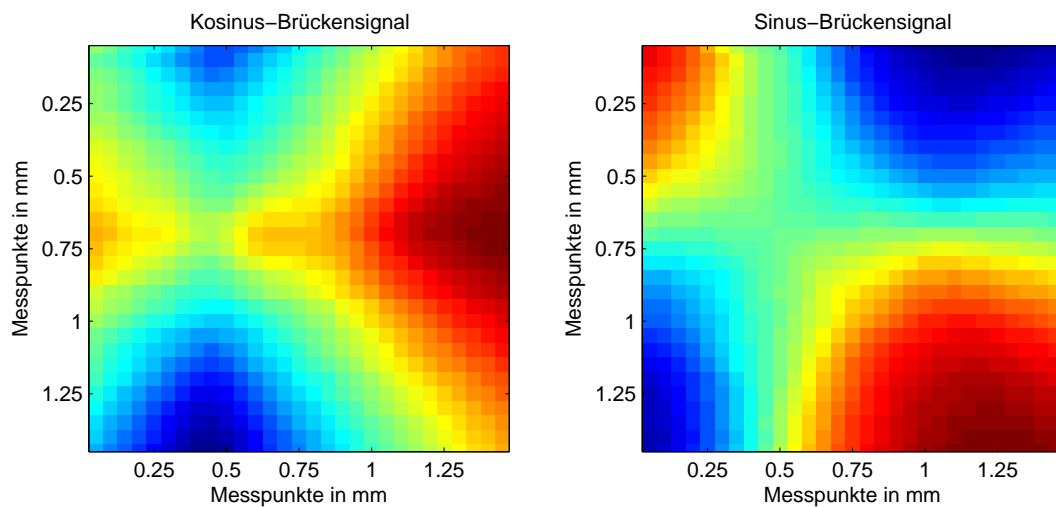


Bild 5.8.: Magnetisches Feld des X-Achsen Spulenpaares, aufgenommen mit dem KMZ60. Die Sensorspannungen wurden farblich kodiert

Da die Spulen einer Achse gegeneinander arbeiten, wird sich zwischen den beiden Spulen erst ein Bereich ergeben, welcher von jeweils einer Spule dominiert wird (farbige Bereiche nahe den Spulenköpfen). Dann folgt ein Bereich in dem sich beide Spulen in Ihrer Wirkung auf das magnetische Feld aufheben (der gelblich-hellblaue Bereich). In diesem Bereich zwischen den Spuleneinflüssen ist der magnetische Mittelpunkt. Da man jeweils nur ein Achsenpaar auf einmal vermessen kann, muss diese Prozedur nochmals mit dem anderen Spulenpaar durchgeführt werden. Zu sehen ist dieses in Bild (5.6). Schaut man sich beide Bereiche des magnetischen Mittelpunktes an, kann man darauf schließen wo sich der magnetische Mittelpunkt bei Gleichstromanregung befinden wird. An dieser Stelle befindet sich die Messposition für das mechanische Drehen mittels Drehmesstisch DMT65. Es ist auf Bild (5.6) auch zu erkennen, dass der Bereich in dem die Messposition liegt, ungefähr 0,75 mm x 0,75 mm groß ist. Das entspricht ungefähr $2/3$ der Fläche der Messbrücken auf dem Winkelsensor. Es ist ersichtlich, dass eine genaue Positionierung sehr schwer zu erreichen ist.

Es hat sich gezeigt, dass die so gefundene Messposition mit dem Mittelpunkt aus der Positionsbestimmung des rotierenden Feldes nahezu übereinstimmt. Messungen beider Positionierungsarten ergaben jedenfalls kaum signifikante Unterschiede in der gefundenen Messposition. Leichte Abweichungen lassen sich eventuell durch Hystereseverluste durch Speisung mit Wechselstrom erklären.

6. Winkelmessungen

Im Folgenden beschäftigt sich die Arbeit genauer mit den Winkelmessungen. Hierbei werden die verschiedenen Methoden der Winkelmessung erläutert. Anschließend wird genauer erklärt, wie die Messungen durchgeführt worden sind und was die relevanten Messgrößen bei einer Winkelmessung sind. Dieses Kapitel ist in drei Abschnitte unterteilt. Sie befassen sich mit den Zielen der Messungen, der Erläuterung der relevanten Messgrößen und der genauen Durchführung der Messungen.

6.1. Zielsetzung der Messungen

Das Ziel der Messungen ist es, heraus zu finden ob die Spezifikationen des Winkelsensors mit dem erbauten Messplatz gemessen werden können. Um hierzu eine Aussage betreffend der Qualität geben zu können, muss herausgefunden werden was die wichtigsten Parameter sind, welche zu einer optimalen Winkelmessung führen. Äußere, störende Einflüsse wie zum Beispiel ein hoher Gradient im magnetischen Feld oder Temperatureinflüsse können hierbei nur indirekt oder gar nicht gemessen werden, bzw. wird deren Einfluss auf die Messungen kurz angedeutet oder außen vor gelassen. Bezüglich des Temperatureinflusses kann jetzt schon die Aussage gemacht werden, dass dieser vollständig ausgelassen wird, da der Winkelsensor KMZ60 in dieser Diplomarbeit mit Kompensierung des Temperaturkoeffizienten betrieben wird. Durch das Einschalten der Temperaturkompensierung sollte diese Fehlerquelle für Winkelmessungen keine Bedeutung mehr haben. Den Einfluss eines niedrigen Gradienten des magnetischen Feldes wird entgegengewirkt, indem man durch die vorangegangenen Positionierungsmaßnahmen im Vorfeld der Messungen diese Fehlerquelle minimiert hat. Die Messungen sollen also vor allem zeigen, wo Fehler die Winkelmessungen des KMZ60 noch stören und ob die Komponenten des gebauten Messplatzes gut genug sind, den geforderten Ansprüchen gerecht zu werden. Die Anforderungen liegen laut Datenblatt des KMZ60 bei folgenden Eckdaten:

- eine Mindestanforderung von $25 \frac{kA}{m}$ magnetischer Feldstärke
- eine Spannungsversorgung von mindestens 2,7V

- eine Einbaulage des Winkelsensors, welche verkippungsfrei im Verhältnis zum externen Magnetfeld gehalten wird.

Ein zu erstellender Messplan sollte auf alle diese Mindestanforderungen des Messobjektes eingehen. Bevor jedoch ein Messplan erstellt wird, wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert, welches die Messgrößen sind und weshalb diese ausgewählt wurden, um die den geschriebenen Anforderungen des Messplatzes gerecht zu werden.

6.2. Bestimmung der Messgrößen

Die Messgrößen lassen sich einzig aus den beiden Brückenausgangssignalen V_{out1} und V_{out2} bestimmen. Aus ihnen lassen sich folgende Informationen auslesen: Offsetspannung der einzelnen Brückenausgangssignale, die Phasenverschiebung der beiden Signale V_{out1} und V_{out2} zueinander und das Verhältnis der Amplituden. Eine weitere Information, welche aus den Brückenausgangssignalen gewonnen werden kann, ist zum Beispiel der Klirrfaktor. Mit diesen Werten aus den Brückenausgangssignalen lässt sich zwar nicht direkt ein Winkel ablesen, dennoch kann man mit Hilfe dieser Informationen eine Aussage treffen, ob die erfassten Brückenausgangsspannungen V_{out1} und V_{out2} eine fehlerfreie Winkelmessung zulassen. Welchen Einfluss genau die angesprochenen Komponenten auf einen Winkelfehler haben, wurde bereits in Kapitel (3.4) beschrieben.

Daraus lässt sich schließen, dass die zu bestimmenden Messgrößen folgende sind:

- das Amplitudenverhältnis der Brückenausgangssignale zueinander, den sogenannten k-Faktor,
- Phasenverschiebung zwischen den Signalen V_{out1} und V_{out2} ,
- die Bestimmung des Offsets der einzelnen Brückenausgangssignale,
- die Bestimmung des Winkels aus den Brückenausgangssignalen V_{out1} und V_{out2} .

Das Amplitudenverhältnis der Brückenausgangssignale ist deshalb wichtig, weil der zu messende Winkel sich direkt aus den Signalen V_{out1} und V_{out2} , durch die rechnerische Beziehung der Formel (3.3) ergibt. Sind die Amplituden der beiden Signale vom Betrag her unterschiedlich, ergeben sich Winkelfehler, da die Winkelmessung darauf ausgelegt ist, dass beide Signale eine gleiche Amplitude aufweisen.

Bei der Phasenverschiebung zwischen V_{out1} und V_{out2} verhält es sich ähnlich. Die beiden Brückensignale sind wie ein Kosinus und ein Sinus um 90° zueinander verschoben. Der errechnete Winkel aus den beiden Signalen (siehe Formel (3.3)) wird sich bei einer

Phasenverschiebung ungleich 90° verändern. Ein Beispiel: wenn V_{out2} den maximalen Amplitudenwert hat, wird V_{out1} den Nulldurchgang haben (bei 90° Phasenverschiebung). Sollte die Phasenverschiebung ungleich 90° sein, würde in dem Fall V_{out1} eventuell kurz vor dem Nulldurchgang stehen. Dadurch würde der Winkel nicht mehr $\pm 45^\circ$ betragen, sondern etwas niedriger liegen. Hierdurch wird ein Winkelfehler erzeugt, da sich der Winkelbereich des Sensors einengt. Deshalb ist es von großem Interesse zu wissen, wie gut oder schlecht die Phasenlage der Brückenausgangssignale ist. In Tabelle (6.1) ist ein kleines Zahlenbeispiel zur besseren Verdeutlichung gegeben.

Phasenverschiebung	V_{out1}	V_{out2}	α
90°	0 V	1 V	$\pm 45^\circ$
$<90^\circ$	0,01 V	1 V	$44,71^\circ$

Tabelle 6.1.: Beispiel eines durch Phasenverschiebung hervorgerufenen Winkelfehlers

Bei der Bestimmung des Offsets handelt es sich im vorliegenden Fall um die Messung eines konstanten Offsets. Dieser konstante Offset wird von der nachgeschalteten Logik erkannt, und reduziert. Wenn aber unterschiedliche Offsetspannungen der beiden Signale V_{out1} und V_{out2} vorliegen, kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass dieser Offset Einfluss auf den gemessenen Winkel hat. Dieser Offset-Fehler hat dann direkten Einfluss auf die Amplituden der Brückenausgangssignale. Die Offset-Fehler müssen nicht unbedingt für beide Brückenausgangssignale gleich sein, aber ein genereller Offset und ein schlechter k-Faktor sind gute Hinweise darauf.

Als letzte Messgröße ist der gemessene Winkel interessant. Hierzu ist jedoch nur die Messung der Signale V_{out1} und V_{out2} erforderlich. Diese müssen dann in die bekannte Formel (3.3) eingesetzt werden, um einen aktuellen Winkel zu berechnen.

6.3. Durchführung/Messplan der Winkelmessung

Nachdem die Messgrößen benannt wurden, werden die Messungen und deren Durchführung beschrieben. In Bild (6.1) ist schematisch der Messaufbau zu sehen. Für die Messungen werden folgende Geräte benötigt:

- 2-Kanal-Funktionsgenerator AFG 3022B der Firma Tektronix (nur für elektrisches Drehen),
- bipolarer Leistungsverstärker BOP36-5M der Firma KEPCO,

- einen Kreuzspulenkasten,
- ein Messinstrument, Oszilloskop MSO3034 oder Digitalvoltmeter Fluke45, zur Erfassung der Brückenausgangssignale.

Um Messungen durchführen zu können wird der Kreuzspulenkasten so beschaltet, dass die beiden Spulen einer Achse parallel geschaltet sind. In der Mitte des Kreuzspulenkastens befindet sich an seiner Messposition der Winkelsensor KMZ60. Für Messungen im rotierenden Feld wird die Spulenanregung durch den Funktionsgenerator AFG3022B erzeugt. Bei Messungen im statischen Feld übernimmt die Spulenanregung, an Stelle des Funktionsgenerators, eine konstante Spannungsquelle. Die Spulenanregung wird durch den bipolaren Leistungsverstärker verstärkt, um so mehr Strom durch die Spulen fließen zu lassen, was eine Erhöhung des magnetischen Feldes zur Folge hat. Der Arbeitsschritt mit der Leistungsverstärkung ist nötig, da weder der Funktionsgenerator AFG3022B, noch eine zur Verfügung stehende Konstantspannungsquelle genug Strom bereit stellt, um die mindestens benötigten $25 \frac{kA}{m}$ im Kreuzspulenkasten zu erzeugen. Da die bipolaren Leistungsverstärker Ausgangsströme von bis zu 5 A zur Verfügung stellen können, ist man zusammen mit dem Großfeld Kreuzspulenkasten in der Lage, eine genügend hohe magnetische Feldstärke zu erzeugen. Die Messdaten werden mittels eines digitalen Speicheroszilloskops aufgenommen. Dabei werden die Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} und die Ausgangsspannungen der Leistungsverstärker gemessen. Bei Messungen mit digitalen Voltmetern werden nur die Brückenausgangssignale gemessen.

Messplan

Hier wird erläutert, wie die vorher beschriebenen Messgrößen erfasst werden sollen. Der Messplan unterteilt sich in eine Definition des Ziels der Messung, die Messeinstellungen welche vorgenommen werden müssen und die Durchführung der Messung.

Winkelmessung:

- **Messziel**
Bei dieser Messung soll unter Vorgabe eines bestimmten Winkels eine Aussage über die Messgenauigkeit des Winkelsensors getroffen werden.
- **Messeinstellungen**
 - Kreuzspulenkasten: Die Spulen werden mit Gleichstrom gespeist, die Spulenpaare sind dabei parallel zu schalten. Der Strom sollte mindestens 1,8 A groß sein. Es muss auf die Temperatur der Spulen geachtet werden, da die Gefahr der Zerstörung durch Wärme droht. Eine Temperatur höher als $65^{\circ}C$ sollte nicht erreicht werden.

- Drehmesstisch DMT65: Verfahren der vorgegebenen Winkelspanne mittels Matlab. Vorher Parameter für den Drehmesstisch festlegen (Microstep, Geschwindigkeit, etc.).
- Sensor: Platzierung an der zuvor ermittelten Messposition.

- **Durchführung**

Zu Beginn der Messung muss der Offset für beide Brückenausgangsspannungen ermittelt werden. Die Spannungen der Messbrücken aufnehmen und mittels Drehmesstisch den Winkelverfahren. Erneute Spannung an den Messbrücken aufnehmen.

k-Faktor Messung:

- **Messziel**

Ziel dieser Messung ist die Ermittlung des Amplitudenverhältnisses der Brückenausgangsspannungen. Die Amplituden werden zueinander ins Verhältnis gesetzt und so der k-Faktor ermittelt.

- **Messeinstellungen**

- Kreuzspulenkasten: Die Spulen werden parallel geschaltet. Bei Anwendung des mechanischen Drehens muss der Gleichstrom mindestens 1,8 A groß sein. Beim elektrischen Drehen sind die Spulenpaare der X- und Y-Achse phasenverschoben mit Wechselstrom von 2,5 A zu versorgen. Eine Temperatur höher als 65°C sollte nicht erreicht werden.
- Drehmesstisch DMT65: Wird nur beim mechanischen Drehen benötigt. Hier sind in Matlab die Einstellungen so vorzunehmen, dass der Drehmesstisch mit einer konstanten Geschwindigkeit mehrere 360°-Umläufe durchfährt.
- Sensor: Platzierung an der zuvor ermittelten Messposition.

- **Durchführung**

Gewünschte Anzahl an 360°-Umläufen (wenn möglich mindestens zehn) mittels digitalem Speicheroszilloskop aufnehmen. Anschließend mittels Matlab den k-Faktor errechnen.

Offset Messung:**• Messziel**

Inhalt dieser Messung ist es, den Offset der Messbrückensignale zu ermitteln. Dabei ist zu überprüfen, ob der Offset während eines Messdurchlaufs konstant bleibt.

• Messeinstellungen

- Kreuzspulenkasten: Die Spulen werden parallel geschaltet. Bei Anwendung des mechanischen Drehens muss der Gleichstrom mindestens 1,8 A groß sein. Beim elektrischen Drehen sind die Spulenpaare der X- und Y-Achse phasenverschoben mit Wechselstrom von 2,5 A zu versorgen. Eine Temperatur höher als 65°C sollte nicht erreicht werden.
- Drehmesstisch DMT65: Wird nur beim mechanischen Drehen benötigt. Hier sind in Matlab die Einstellungen so vorzunehmen, dass der Drehmesstisch mit einer konstanten Geschwindigkeit mehrere 360°-Umläufe durchfährt.
- Sensor: Platzierung an der zuvor ermittelten Messposition.

• Durchführung

Gewünschte Anzahl an 360°-Umläufen (wenn möglich mindestens zehn) mittels digitalem Speicheroszilloskop aufnehmen. Anschließend mittels Matlab den Offset er rechnen.

Messung der Phasenverschiebung:**• Messziel**

Mittels dieser Messung soll untersucht werden, ob die Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen über mehrere 360°-Umläufe konstant bleibt.

• Messeinstellungen

- Kreuzspulenkasten: Die Spulen werden parallel geschaltet. Bei Anwendung des mechanischen Drehens muss der Gleichstrom mindestens 1,8 A groß sein. Beim elektrischen Drehen sind die Spulenpaare der X- und Y-Achse phasenverschoben mit Wechselstrom von 2,5 A zu versorgen. Eine Temperatur höher als 65°C sollte nicht erreicht werden.
- Drehmesstisch DMT65: Wird nur beim mechanischen Drehen benötigt. Hier sind in Matlab die Einstellungen so vorzunehmen, dass der Drehmesstisch mit einer konstanten Geschwindigkeit mehrere 360°-Umläufe durchfährt.

– Sensor: Platzierung an der zuvor ermittelten Messposition.

- **Durchführung**

Gewünschte Anzahl an 360°-Umläufen (wenn möglich mindestens zehn) mittels digitalem Speicheroszilloskop aufnehmen. Anschließend mittels Matlab die Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen bei jedem Nulldurchgang der Signale ermitteln.

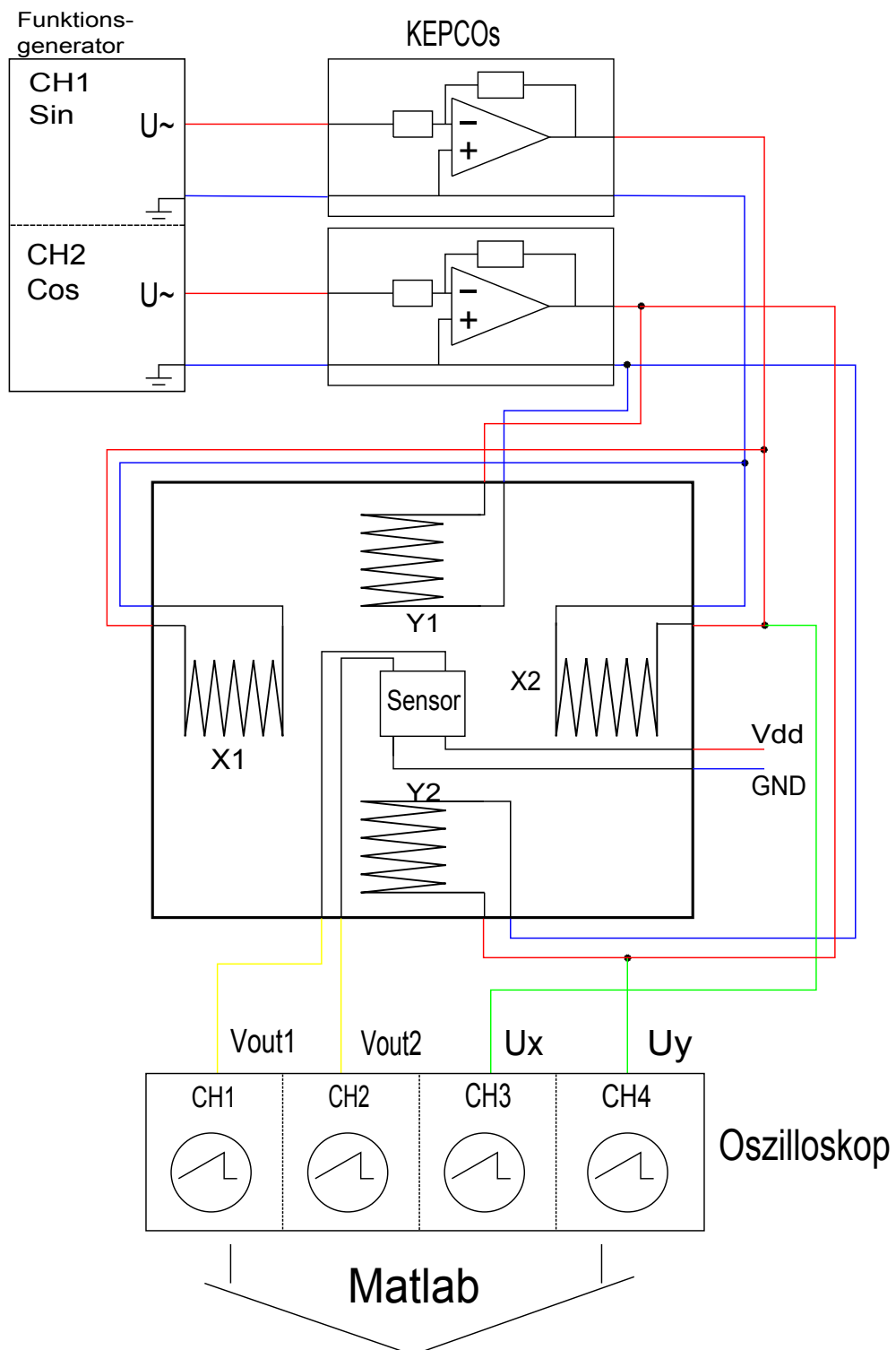


Bild 6.1.: Messaufbau in schematischer Ansicht

7. Messaufbau

In diesem Kapitel wird beschrieben mit welchen Mitteln der Messstand realisiert wurde. Das Kapitel gliedert sich in einen Abschnitt über die Hardware-Einrichtungen (Messgestell, Achsenmotorisierung, Achsenansteuerung) und einem Abschnitt über die notwendige Software, welche verwandt wird, um Messungen durchzuführen und die gesammelten Messdaten auszuwerten.

7.1. Hardware

Als erstes wird die Hardware des Messplatzes beschrieben. Die Hardware umfasst das eigentliche Grundgestell, den Koordinatentisch inklusive der Motoren zum Verfahren des Kreuzspulenkastens, einer höhenverstellbaren Z-Achse, einer Steuerplatine zum Ansteuern der Motoreinheiten und einem Aufsatz zur Temperaturkontrolle.

7.1.1. Messgestell

Den Rahmen für alle Auf- und Anbauten bildet ein Holzrahmen aus MDF¹-Platten. Mit diesem Werkstoff wurde das Gestell des Messplatzes sowie der Aufsatz mit den Temperaturanzeigen erstellt. Die MDF-Platten wurden als Baumaterial ausgewählt, da sie sich gut verarbeiten lassen, leicht und kostengünstig zu beschaffen sind. Das wichtigste Kriterium zum Bau des Gestells mit MDF-Platte besteht darin, dass das Material nicht magnetisch ist. Nachteile dieses Werkstoffs sind, wie bei allen Holzwerkstoffen auch, dass die MDF-Platten nicht resistent gegenüber Feuchtigkeit sind. Das ist insofern erwähnenswert, da die MDF-Platten mit längerer Standdauer eine Verformung auf Grund der Luftfeuchtigkeit erfahren könnten, und sich somit leicht verziehen könnten. Dieses hätte zur Folge, dass sich der gesamte Messaufbau leicht verändern, sprich Verkippen könnte. Diese Verkippung würde, ab einer gewissen Größe, Einfluss auf die Genauigkeit des Winkelsensors haben, so dass man vor Messungen erst einmal wieder herausfinden muss wie die beste Messposition des Sensor ist um die Verkippung des Holzgestells auszugleichen. Diese Fehlerquelle ist aber

¹Mitteldichte Holzfaserverplatte

hinnehmbar, wenn man den Kostenfaktor und die leichtere Verarbeitung gegenüber einem Gestell aus einem anderen nicht magnetischen Werkstoff (z.B. Aluminium) vergleicht.

Das Gestell des Messplatzes hat eine L-Form. Dabei wird die aufgestellte Rückwand benutzt, um dort eine höhenverstellbare Z-Achse zu etablieren. Mittels dieser Z-Achse lässt sich der Winkelsensor in der Mitte des Kreuzspulenkastens platzieren. Die Z-Achse wurde durch einen MICRO - Koordinatentisch KT70 der Firma Proxxon realisiert. Die Z-Achse wurde nicht motorisiert, da die eingestellte Tiefe im Kreuzspulenkasten meistens konstant gehalten wird. Bilder des Messplatzes sind im Anhang zu finden.

Die Grundfläche des waagerechten Teils des Gestells bietet Platz für einen weiteren Koordinatentisch KT70 der Firma Proxxon. Mit diesem zweiten Koordinatentisch wird die X- und Y-Achse des Messplatzes realisiert. Der Verstellweg der Y-Achse beträgt 46 mm, der Verstellweg der X-Achse beträgt 134 mm. Jede Achse wird von einem Schrittmotor QSH4218 der Firma Trinamic verfahren. Mittig auf dem Koordinatentisch ist eine Adapterplatte befestigt. Mittels der Adapterplatte wird der motorisierte Drehmesstisch DMT65 der Firma Owis mit dem Koordinatentisch verbunden. Auf dem Drehtisch wird der Kreuzspulenkasten mittels einer M4 Messingschraube befestigt.

Die Grundmaße des Gestells sind:

- Höhe: 51 cm
- Breite: 29,6 cm
- Abmaß Grundfläche: 40 x 26 cm.

Auf das Gestell des Messplatzes kann ein zusätzlicher Rahmen aus MDF-Platten gestellt werden. Dieser zusätzliche Aufbau beinhaltet 4 Temperaturanzeigen inklusive Thermometern und zwei Amperemeter. Dieser zusätzliche Aufbau dient der Temperaturüberwachung der Spulen im Kreuzspulenkasten. Er findet jedoch nur Verwendung, wenn der Kreuzspulenkasten nicht mechanisch gedreht wird. Der Grund hierfür liegt darin, dass es Probleme mit der Kabelführung der Thermometer gibt, wenn eine mechanische Drehung mittels des Drehmesstisches stattfindet.

Der Winkelsensor KMZ60 befindet sich in einem ZIF-Socket, welcher an der Spitze eines Holzstabes angebracht ist. An dem Sensorstab befindet sich außerdem eine Platine, auf welche die 8 Ausgänge des Winkelsensors geführt sind. So ist es möglich, die Sensorsignale direkt, z.B. mittels eines Oszilloskops abzurufen und weiter zu verarbeiten. Als Material für den Sensorstab wurde ebenfalls Holz gewählt. Der Grund hierfür liegt darin Begründet, dass

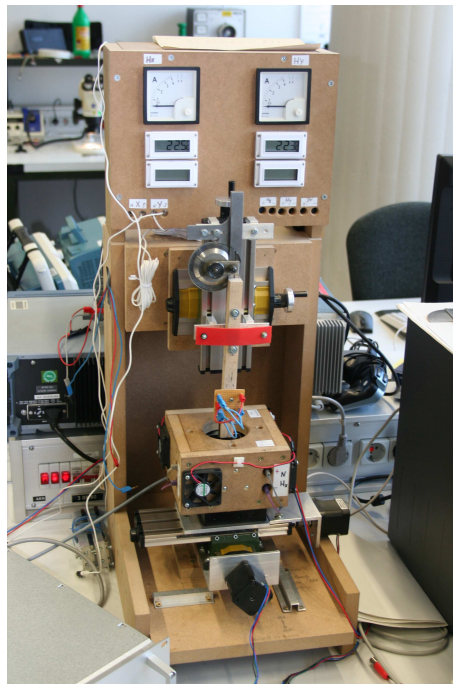


Bild 7.1.: Messplatz inklusive Temperaturüberwachung. Zu sehen sind die Motoren der X- und Y-Achse, der Drehmesstisch, ein Kreuzspulenkasten und die Verkippungseinheit der Z-Achse mit Sensorstab

Holz keinen Einfluss auf magnetische Felder ausübt. Ein Bild des Sensorstabs samt ZIF-Socket befindet sich im Anhang.

7.1.2. Motorisierung der Achsen

Die Achsen des Koordinatentisches KT70 sind mit Schrittmotoren QSH4218 der Firma Trinamic ausgerüstet. Diese Motoren erlauben eine Automatisierung des Verstellweges. In Tabelle (7.1) kann abgelesen werden, wie groß oder klein die Verstellwege der Achsenmotorisierung ausfallen können. Abhängig ist die Weite des Verstellweges von der Microstep-Auflösung, mit welcher die maximale Schrittweite des Motors unterteilt wird. Die maximale Unterteilung beträgt $1/64$. Genauer findet man im Handbuch der QSH4218 Schrittmotoren [18] und im Handbuch der Steuerungsplatine TMCM-351 von Trinamic [19]. Wie aus Tabelle (7.1) ersichtlich ist, benötigt man mit der Einstellung Microstep 0 200 Schritte um 1 mm Verstellweg einer Achse zu erreichen. Bei der Einstellung Microstep 6, wird 1 mm Verstellweg auf 12800 Schritte aufgeteilt. Mit solchen Aufteilungen ist es möglich, genauere Wegintervalle anzufahren.

Microstep	0	1	2	3	4	5	6
Unterteilung	1/1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
Step/mm	200	400	800	1600	3200	6400	12800

Tabelle 7.1.: Schrittweiten der Schrittmotoren QSH4218 zum Verfahren der X- und Y-Achse

Microstep	0	1	2	3	4	5	6
Unterteilung	1/1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
$^{\circ}/1\text{Step}$	0,01	0,005	0,0025	0,00125	0,000625	0,0003125	0,0001562
Step/ $^{\circ}$	100	200	400	800	1600	3200	6400

Tabelle 7.2.: Drehmesstisch DMT65 Schrittweiten pro Microstep Auflösung

Eine Betrachtung der Verfahrensgeschwindigkeit der Y- und X-Achse findet nicht statt. Da es für die gestellte Aufgabe, das Ansteuern einer vorher festgelegten Messposition, mehr auf die Genauigkeit der Positionierung ankommt, als auf eine hohe Geschwindigkeit für den Weg zur Messposition. Das M-File zum Ansteuern der Achsen befindet sich im Abschnitt Software dieses Kapitels.

Als nächstes wird die motorische Rotation der Z-Achse des Messplatzes beschrieben. Diese Rotation erfolgt über den bereits erwähnten Drehmesstisch DMT65 der Firma Owis [10]. Der Drehmesstisch wird ebenfalls mit der Steuerungsplatine und über ein M-File gesteuert, welches im Abschnitt Software näher beschrieben wird. Hier soll erwähnt werden, dass es möglich ist, mittels des Drehmesstisches DMT65

- vorher festgelegte Winkelpositionen anzufahren (z.B.: 10° , 90° , 270°),
- mehrere volle Umdrehungen zu verfahren,
- mehrere volle Umdrehungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu verfahren.

Bei der Ansteuerung bestimmter Winkel wird der Drehmesstisch von seiner Referenzposition² aus gestartet. Bei dieser Art der Verwendung, einfaches Verfahren vorher festgelegter Winkel oder Winkeldifferenzen, ist die Positionierungsgenauigkeit von Bedeutung. Tabelle (7.2) gibt einen genaueren Überblick über die Positionierungsgenauigkeit bei verschiedenen Microstep Einstellungen.

Wie aus Tabelle (7.2) hervor geht, liegt die kleinste Schrittweite des Drehmesstisches bei $0,0001562^{\circ}$ für einen Schritt des Schrittmotors. Die größte Schrittweite erhält man bei Microstep 0. Dort wird ein Winkel von $0,01^{\circ}$ für einen Schritt des Schrittmotors verfahren.

²Die Referenzfahrt wird über einen eigenen Befehl ausgeführt. Als Referenz dienen hier Stop-Flags, welche über die Steuerungsplatine TMCM-351 [19] gesetzt werden.

Praktisch wird eine Auflösung von höchstens 1/4 oder 1/8 benötigt, da die Winkelgenauigkeit des KMZ60 laut Datenblatt des Herstellers bei $0,01^\circ$ [9] liegt. Wählt man also eine Schrittweite unter der Winkelgenauigkeit des Winkelsensors, kann man mögliche Fehler³ des Drehmesstisches (hier speziell der Verlust einiger Schritte) auf eine Winkelmessung minimieren.

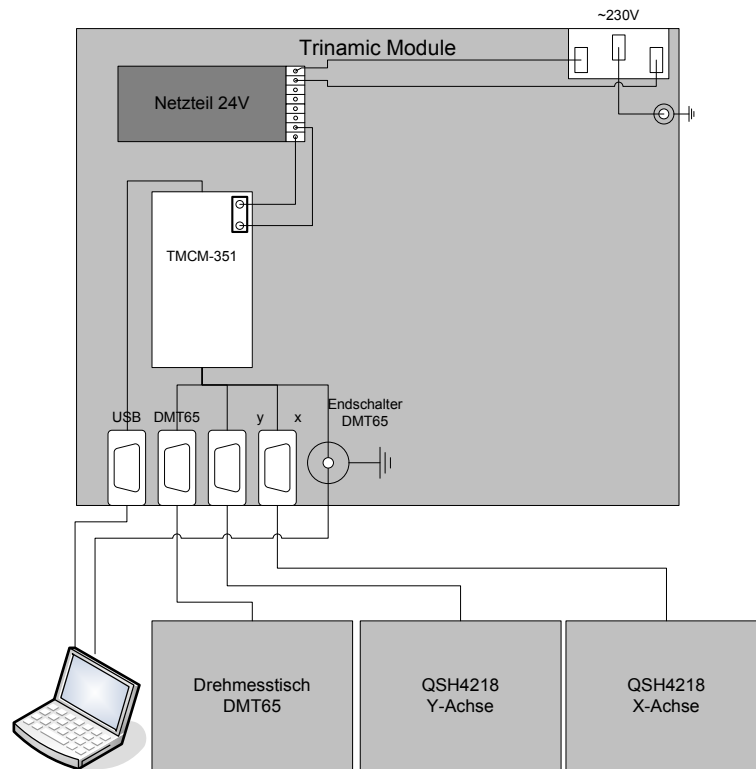


Bild 7.2.: Schematische Darstellung der Ansteuerung der verschieden motorisierten Achsen und des Drehmesstisches mittels der Steuerungsplatine TMC351

Für Messungen, bei denen der DMT65 mehrere Umdrehungen nacheinander zu bewältigen hat, ist nicht das Anfahren eines bestimmten Winkels von Interesse. Hier ist von Bedeutung mit welcher Geschwindigkeit sich der Drehmesstisch bewegt, um so einen Rückschluss auf die Frequenz einer vollen Umdrehung machen zu können. Aufschluss über die Verfahrensgeschwindigkeiten bei bestimmten Microstep Einstellungen gibt Tabelle (7.3).

Bei Tabelle (7.3) gibt es eine wichtige Bedingung zu beachten. Die angegebenen Werte der Winkelgeschwindigkeiten des DMT65 für die Microstep Einstellungen 0, 1 und 2 überschrei-

³Im Datenblatt der Firma Owis [10], wird als bidirektionaler Wiederholfehler weniger als $0,02^\circ$ bei Microstep 0 angegeben. Dieser Fehler verringert sich ab Microstep 2 zu einem Wiederholfehler von weniger als $0,005^\circ$.

Microstep	0	1	2	3	4	5	6
Unterteilung	1/1	1/2	1/4	1/8	1/16	1/32	1/64
Step/Sekunde	30517,58	15258,79	7629,4	3814,7	1907,35	953,67	476,84
°/Sekunde	305,17	152,89	76,29	38,15	19,07	9,53	4,77

Tabelle 7.3.: Drehmesstisch DMT65 Winkelgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Microstep Einstellungen, bezogen auf die Geschwindigkeitseinstellung 1000

ten die maximale Geschwindigkeit des DMT65 von 65° pro Sekunde [10].

Als nächstes wurden die angegebenen Geschwindigkeiten in Tabelle (8.3) für den Geschwindigkeitswert 1000 berechnet und beziehen sich auf Umlaufgeschwindigkeiten ohne Berücksichtigung der Anlaufgeschwindigkeit, also bei eingefahrenem Drehmesstisch. Der Geschwindigkeitswert kann variabel eingestellt werden. Der Einstellbereich geht von 1 bis 2047. Als einzige Bedingung gilt hier das Einhalten des maximalen Motorstromes von 1,8 A. Die Winkelgeschwindigkeiten, im eingefahrenen Zustand, berechnen sich wie folgt:

$$R[Hz] = \frac{f_{clk}[Hz] \cdot velocity}{2^{pulse_{div}} \cdot 2048 \cdot 32} \quad (7.1)$$

Zu finden ist diese Formel in [17]. f_{clk} wird von der Steuerungsplatine TMCM-351 vorgegeben. Dieser Wert kann durch eine Messung an der Steuerungsplatine herausgefunden werden. Die Variable *velocity* beschreibt die Geschwindigkeit des Drehmesstisches. Aus Tabelle (7.3) lässt sich nun errechnen, wie groß die Frequenz einer vollen Umdrehung ist.

$$f_{UML} = \frac{R[Hz]}{360^\circ} \quad (7.2)$$

7.2. Software

In diesem Unterkapitel wird genauer auf die Software eingegangen, welche nötig ist, um den Messplatz automatisiert betreiben zu können. Die nötige Software teilt sich auf in Programme (genauer gesagt M-Files) zur Ansteuerung der Hardware und Programme zum Auswerten der Messergebnisse. Alle Programme wurden unter Matlab generiert. Es handelt sich um Matlab-Files⁴, da die Automatisierung des Messplatzes und die Auswertung und Weiterverarbeitung ausschließlich mittels Matlab erfolgt. Alle M-Files sind modular aufgebaut. Das

⁴Abgekürzt als M-File, welches ein einfaches ASCII Skript ist, das Matlab Befehle enthält.

bedeutet, sie sind so geschrieben, dass man sie beliebig in andere Programme als Funktion einbauen kann. Dadurch können Messprogramme, welche den gesamten Ablauf einer Messroutine steuern, einfach modular aufgebaut werden.

Bild (7.1) soll den Aufbau des verwendeten M-Files Messansteuerung.m schematisch darstellen. Den kompletten Quellcode findet man im Anhang unter Software. Die Arbeitsschritte, welche im Hauptprogramm abgearbeitet werden, sind im Bild (7.1) eckig dargestellt. Alle Arbeitsschritte welche durch den modularen Aufbau, also durch gesonderte Funktionen bearbeitet werden sind im Diagramm oval dargestellt. Durch den modularen Aufbau ist es leichter möglich, anstatt des M-Files für die Ansteuerung des Oszilloskops zum Beispiel ein M-File zur Ansteuerung eines anderen Messinstruments zu benutzen, ohne gleich das komplette M-File Messansteuerung.m neu zu schreiben.

7.2.1. Hardwareansteuerung

In diesem Abschnitt werden die M-Files zur Hardwareansteuerung beschrieben. Die zu steuernde Hardware besteht aus den Motoren der X- und Y-Achse, dem Drehmesstisch DMT65, einem Oszilloskop der Firma Tektronix oder einem Digitalvoltmetern Fluke45 der gleichnamigen Firma.

Ansteuerung der motorisierten Achsen

Folgende M-Files werden zur Ansteuerung der Achsen und zum Ansteuern des Drehmesstisches verwendet:

- Ansteuerung-YAchse.m, zum Verfahren der Y-Achse;
- Ansteuerung-XAchse.m, zum Verfahren der X-Achse;
- Ansteuerung-RotAchse.m, zur Ansteuerung des Drehmesstisches DMT65.

Alle aufgezählten M-Files sind im Anhang zu finden. Über diese M-Files wird nur eine Initialisierung der jeweiligen Motoren erreicht. Es werden Rahmenbedingungen gesetzt, wie zum Beispiel die Parameter Microstep oder das Setzen des Referenzpunktes (nur DMT65). Genauere Angaben der möglichen Parameter gibt das Handbuch der Steuerungsplatine TMCM-351, zu finden unter [19].

Ansteuerung der Messinstrumente

Genau wie die Motoren der Achsen, werden auch die Messinstrumente über M-Files initialisiert und ausgelesen. Für die Benutzung der Messinstrumente sind folgende M-Files vorgesehen:

- Ansteuerung-Scope.m, zur Bedienung des digitalen Speicheroszilloskops der Firma Tektronix;
- Ansteuerung-Fluke.m, dient zum Auslesen der digitalen Voltmeter Fluke45.

Diese M-Files sind nur unter Matlab zu gebrauchen, wenn vorher ein Model-File, z.B. scope.mdd erstellt wurde. In diesem Model sind alle wichtigen Informationen hinterlegt. Diese umfassen zum Beispiel die Verbindungs-Einstellungen (Baud-Rate, COM-Port, etc.) und gerätespezifische Befehle (z.B. zum Abrufen der Messwerte oder Kanaleinstellungen des Speicheroszilloskops).

7.2.2. Messdatenauswertung

Hier sollen die verwendeten M-Files zur Messdatenauswertung behandelt werden. Aufgaben der Messdatenauswertung sind:

- Erfassung der Amplituden der Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} ,
- Erfassung der Offset-Spannungen der Brückenausgangssignale,
- Ermitteln der Frequenz der Brückenausgangssignale,
- Durchführung der Klirrfaktorberechnung,
- Graphische Darstellung der Messwerte und der Auswertung.

Bis auf die grafische Darstellung werden alle anderen Aufgaben vom M-File Signalauswertung.m übernommen. Das entsprechende Listing befindet sich im Anhang. Der Ablauf von Signalauswertung.m soll hier etwas genauer beschrieben werden, da diese Funktion die Auswertung der Signale V_{out1} und V_{out2} vollständig übernimmt. Bild (7.2) zeigt den Programmablauf von Signalauswertung.m.

Als erstes erfolgt eine Parameterdeklaration. Hier werden alle relevanten Einstellungen vorgenommen. Wichtig ist hier die zu erwartende Frequenz der Brückenausgangssignale und basierend darauf eine Toleranzschwelle um die zu erwartende Frequenz. Dies wird für die Klirrfaktorberechnung benötigt. Die Klirrfaktorberechnung basiert auf der mathematischen Grundlage aus Kapitel (5) und wurde einfach in Matlab umgesetzt. Die Klirrfaktorberechnung

wurde als Funktion geschrieben und findet sich im Anhang unter harmonics.m.

Der nächste Schritt innerhalb des M-Files Signalauswertung.m befasst sich mit der Bestimmung des Offsets der beiden Brückenausgangssignale. Dazu werden das Maximum und das Minimum über die Matlab-Befehle `max()` und `min()` ermittelt. Durch die Differenz der Rückgabewerte von `min()` und `max()` kann auf das Signal-Offset geschlossen werden.

Danach erfolgt die Auswertung der Brückenausgangssignale V_{out1} (COS-Signal) und V_{out2} (SIN-Signal). Hierzu werden als erster Schritt die ersten vier Maxima und die ersten vier Minima ermittelt. Dies geschieht auf der Grundlage der zu erwartenden Frequenz. Es wird angenommen, dass innerhalb von einer Periodendauer nur ein Maximum und ein Minimum vorkommen. Ist das erste Maximum gefunden, werden von dieser Position aus die nächsten drei Maxima gesucht (innerhalb einer angegebenen Toleranz, falls die Periodendauer nicht konstant ist). Nach Ermittlung der vier Maxima und Minima wird ein Nulldurchgang ermittelt. Dieser Nulldurchgang ist die Halbierung des arithmetischen Mittels der Differenz der Summe aus den vier Minima und der Summe aus den vier Maxima.

$$U_{Null} = \frac{\sum U_{max} - \sum U_{min}}{2} \quad (7.3)$$

Sollte dieser rechnerisch ermittelte Wert nicht in der diskreten Datenreihe der Brückenausgangssignale existieren, wird um die Position des zu erwartenden Nulldurchgangs der nächst gelegene diskrete Messwert gesucht und dort der Nulldurchgang angenommen. Der hierbei auftretende Fehler erweist sich als annehmbar, da die Suchtoleranz so klein eingestellt ist, dass immer der nächst mögliche diskrete Messwert als Nulldurchgang angenommen wird. Der maximale Fehler in Bezug auf die Phase hängt hier von der Abtastrate des Oszilloskops ab. Bei der üblichen Abtastrate von 100 kHz und einer Frequenz der Brückenausgangssignale von 4 Hz, würde der Einfluss auf die Phase gerade mal $0,0000144^\circ$ ausmachen. Dieser Fehler wurde als akzeptabel hingenommen. Auf Basis des Nulldurchgangs wird die Frequenz der Signale V_{out1} und V_{out2} ermittelt.

Mit der Kenntnis der Nulldurchgänge von V_{out1} und V_{out2} wird die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen ermittelt. Ideal wäre eine konstante Phasenverschiebung von 90° . Wenig Aufwand bereitet die Berechnung des k-Faktors. Hier werden einfach die Amplituden der beiden Brückenausgangssignale ins Verhältnis zueinander gesetzt. Diese beiden Rechenoperationen benötigen nicht viel Aufwand und werden daher nicht eingehender betrachtet.

Als letzte Berechnung erfolgt der Klirrfaktor. Eine detaillierte mathematische Beschreibung befindet sich weiter vorne in dieser Diplomarbeit. Es sei hier erwähnt, dass die Klirrfaktorberechnung durch eine ausgelagerte Funktion erfolgt. Die Funktion `harmonics.m` befindet sich im Anhang. In dieser Funktion wird eine DFT durchgeführt und anschließend die jeweiligen Harmonischen addiert und die resultierenden Summen miteinander geteilt. Näheres im Kapitel (5) und im M-File Ausdruck im Anhang.

Als letztes wird auf die graphische Darstellung eingegangen. Exemplarisch für solche M-Files ist im Anhang `plot.m` gezeigt. In solchen Matlab-Files wird durch `plot`-Befehle (z.B. `imagesc()`, `surf()`) eine grafische Darstellung der Ergebnisse erzeugt. Diese M-Files umfassen gleichzeitig auch Achsenbeschriftung und Skalierungen der Grafiken. Für genauere Einzelheiten wird auf die Matlab-Hilfe verwiesen und auf die entsprechenden M-Files im Anhang.

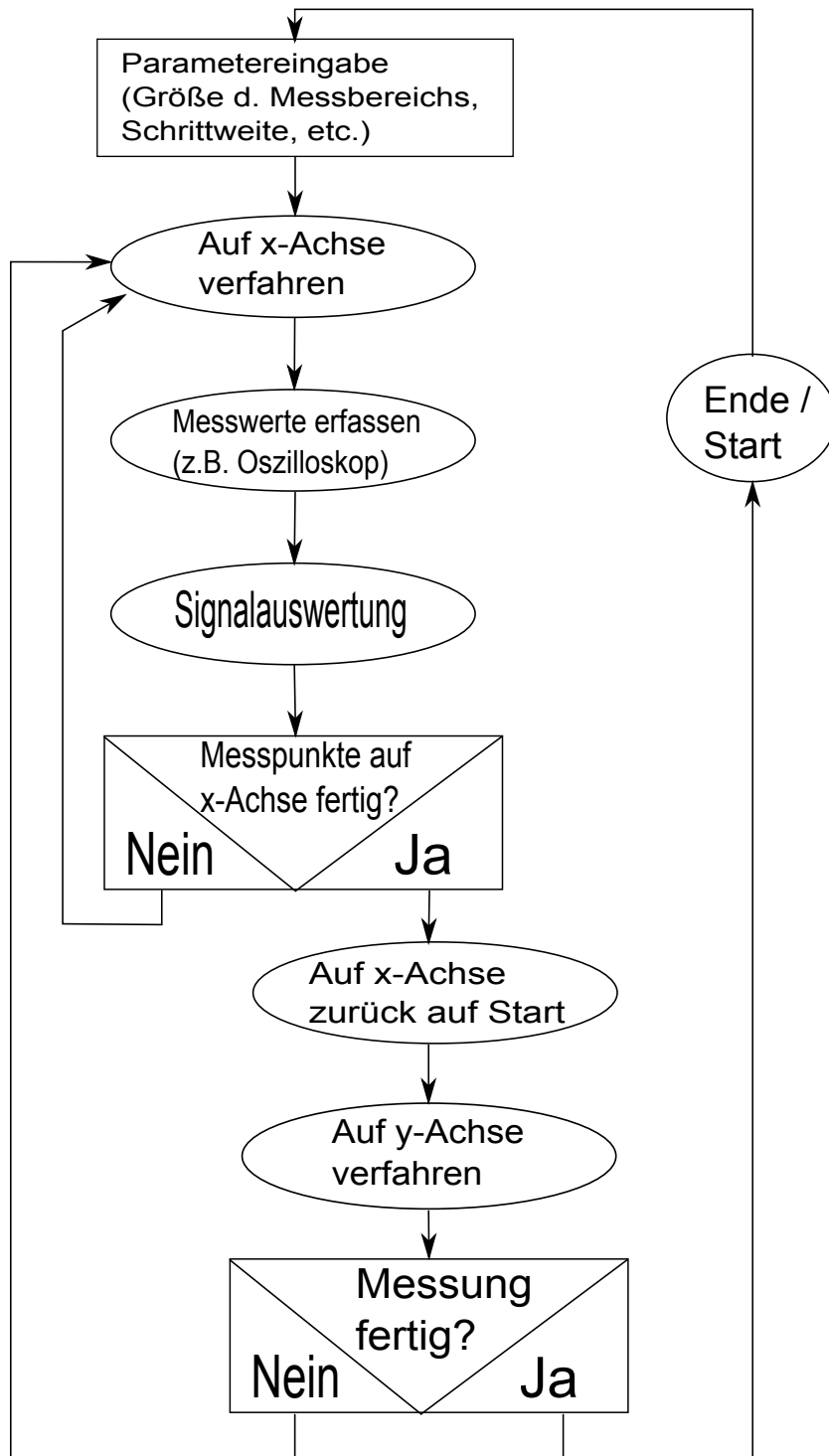


Bild 7.3.: Flussdiagramm von Messansteuerung.m

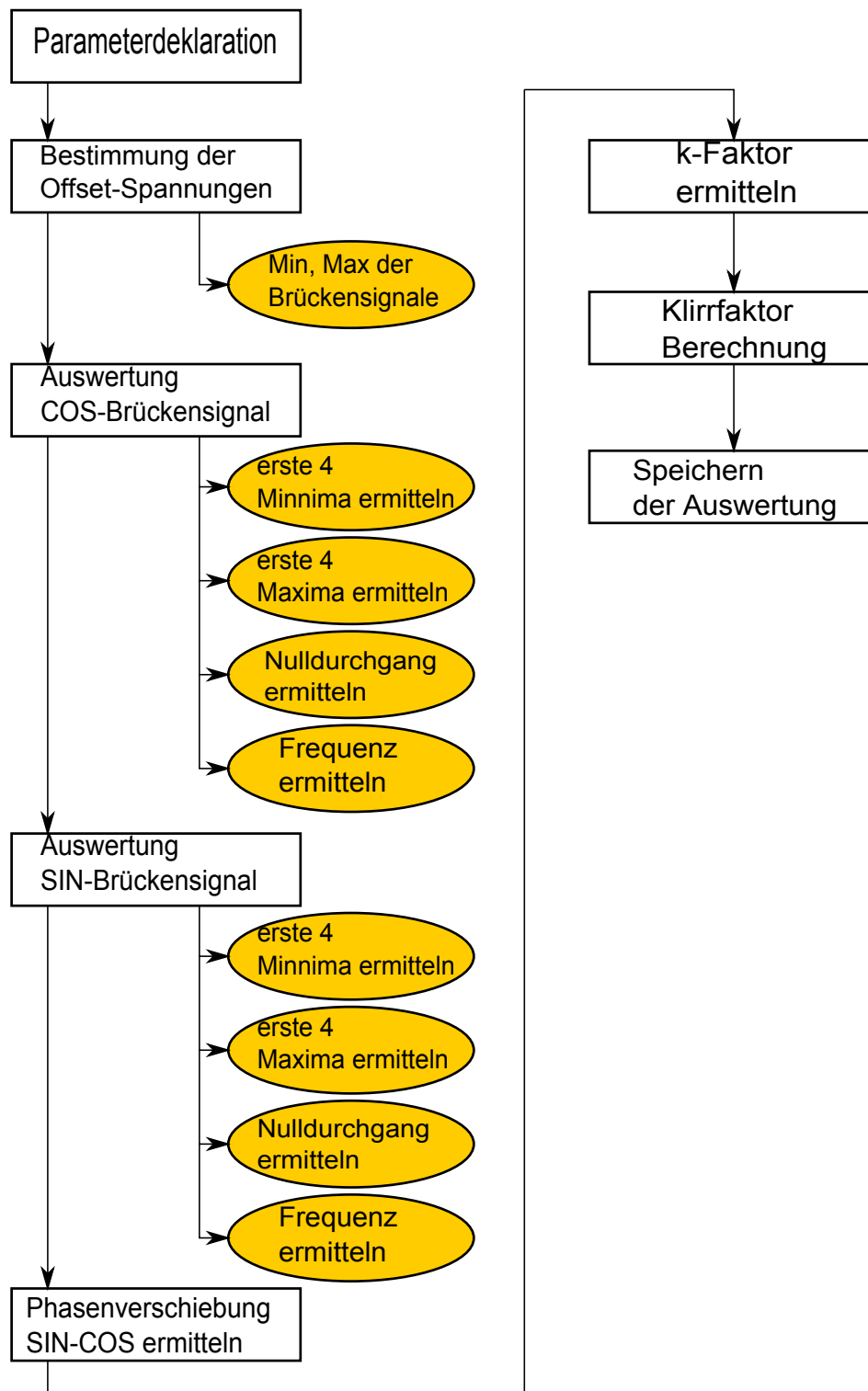


Bild 7.4.: Flussdiagramm von Signalauswertung.m

8. Auswertung der Messdaten

Dieses Kapitel befasst sich mit den gewonnenen Messdaten und deren Auswertung. Es ist in die zwei verschiedenen Möglichkeiten das magnetische Feld des Kreuzspulenkastens anzusteuern unterteilt. Zum einen werden die Messergebnisse sortiert nach der Methode des elektrischen Drehens, mittels Funktionsgenerator und der Methode des mechanischen Drehens mittels Drehmesstisch DMT65. Die beiden Methoden sind ferner unterteilt in die jeweiligen Messgrößen. Am Ende des Kapitels erfolgt eine Zusammenfassung der Messergebnisse.

8.1. Ergebnisse des elektrischen Drehens

In diesem Abschnitt finden sich die Messergebnisse des elektrischen Drehens. Zuerst wurde das elektrische Drehen ausschließlich als Methode zur Messpositionsbestimmung verwendet. Nachdem die Position mit dem niedrigsten Klirrfaktor bestimmt wurde, sollten alle weiteren Messungen unter Zuhilfenahme des Drehmesstisches DMT65 erfolgen. Da jedoch während der Phase der Positionsbestimmung schon gut verwertbare Informationen gespeichert wurden (Klirrfaktor, Offset, k-Faktor, etc.), wurde beschlossen auch mittels elektrischen Drehens des magnetischen Feldes Winkelmessungen an der gefundenen Messposition vorzunehmen. Das Hauptaugenmerk bei der Auswertung liegt auf der Winkelmessung. Zudem erfolgt aber auch eine Auswertung aller anderen Messgrößen.

8.1.1. Auswertung Winkelmessungen

Die Winkelmessung beim elektrischen Drehen erfolgt nicht durch das Einstellen eines bestimmten Winkels, um welchen das Feld gedreht wird. Um eine Winkelmessung mittels elektrischen Drehens durchzuführen, wird der Sensor an der durch den minimalen Klirrfaktor ermittelten Messposition positioniert. Dann wird das magnetische Feld der Spulen so angeregt, dass es rotiert. Hier handelt es sich um die gleiche Vorgehensweise der Positionsbestimmung wie im rotierenden Feld.

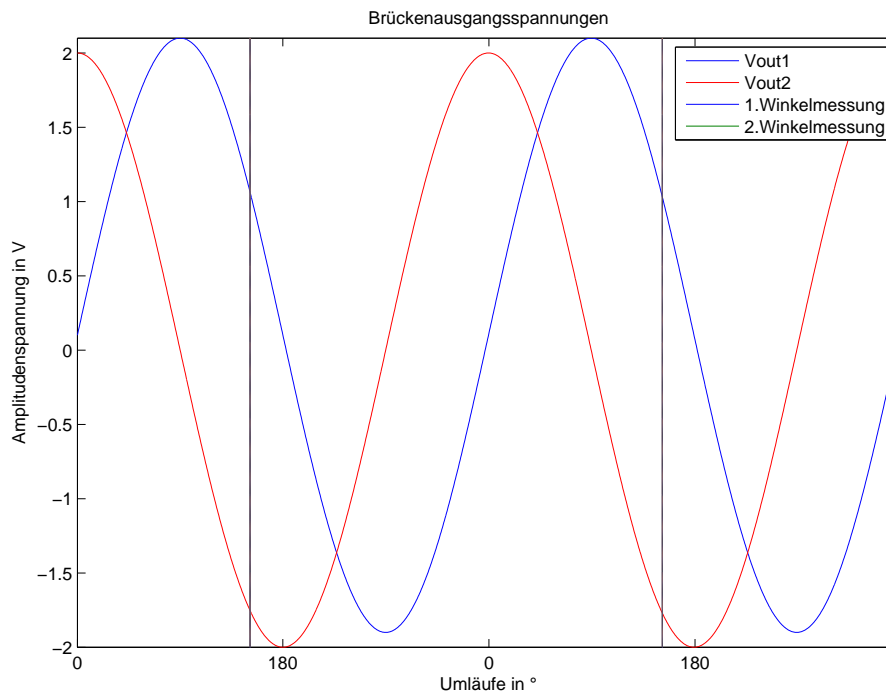


Bild 8.1.: Winkelmessung beim elektrischen Drehen, dargestellt durch eine Matlab Simulation. Mit eingezeichnet sind beispielhaft die Positionen, an denen Winkelmessungen vorgenommen sind.

Eine Winkelmessung, wie sie beim rotierenden Feld durchgeführt wird, ist in Bild (8.1) zu sehen. Durch die Kenntnis der Frequenz der Spulenanregung ist man in der Lage zu berechnen, wie viel Zeit eine Umdrehung von 360° im Spulenkasten braucht. Bekannt ist, dass der Winkelsensor auf eine Eingangsfrequenz mit der doppelten Frequenz antwortet. Daher kann man für die Zeit einer 360° -Drehung definieren:

$$T_{Umlauf} = \frac{1}{2 \cdot f_{Anregung}} \quad (8.1)$$

$f_{Anregung}$ ist die Frequenz des Funktionsgenerators für die Stromversorgung der Spulen. Zwar stellt die Abszisse in Bild (8.1) einen Winkel da und hat mit einer zeitlichen Einteilung wenig gemeinsam, dennoch braucht man eine zeitliche Periode, um 360° -Grad Drehungen zu messen. Es muss eine Umrechnung von der Zeitachse der Daten des Oszilloskops hin zur Winkelachse des Winkelsensors erfolgen. Mit folgender Formel (8.2)¹ kann man in Ab-

¹Mit Abtastpunkten und Zeitbasis sind die Einstellungen beim Oszilloskop gemeint. Zeitbasis ist die komplette Aufzeichnungslänge in Sekunden, Abtastwerte stehen für die Anzahl der Abtastwerte während der Zeitbasis.

hängigkeit der Abtastrate des Oszilloskops errechnen wie viel diskrete Abtastwerte M_{Abtast} benötigt werden, um einen Vollkreis mit 360° zu bekommen:

$$M_{Abtast} = \frac{T_{Umlauf} \cdot \text{Abtastpunkte}_{Osz}}{\text{Zeitbasis}_{Osz}} \quad (8.2)$$

Mit dem Wissen, wie viele Abtastpunkte für einen Winkel von 360° benötigt werden, kann man nun beginnen Messreihen aufzuzeichnen. Bei diesen Messreihen wird dann an einem bestimmten Zeitpunkt t_1 eine Winkelmessung durchgeführt. Diese Messung wird zu den Zeitpunkten $t_2 = t_1 + M_{Abtast}$ und $t_n = n \cdot (t_1 + M_{Abtast})$ wiederholt. Im Idealfall würde immer derselbe Winkel gemessen werden.

Tabelle (8.1) zeigt die Einstellungen der benötigten Geräte und Messinstrumente, mit der die Messreihen zur Winkelbestimmung aufgenommen wurden. Bild (8.2) zeigt einen Ausschnitt aus einer solchen Winkelmessung. Die t_n -Winkelmessungen werden auf die t_1 -Winkelmessung bezogen. Als Ergebnis erhält man die Winkeldifferenz und somit eine erste Einschätzung der Genauigkeit des Winkelsensors.

Gerät	Einstellung	Einstellungswert 1	Einstellungswert 2
Funktionsgenerator AFG 3022B	Spannung (V_{pp})	X-Spulen 10	Y-Spulen 10
	Phase ($^\circ$)	0	90
	Frequenz (Hz)	2	2
KepCos BOP36-5M	Verstärkung	5	5
	Widerstand ($k\Omega$)	20	20
Großfeld- spulenkasten	Beschaltung d. Spulen	X-Spulen parallel	Y-Spulen parallel
	Versorgungsspannung (V_{pp})	50	50
	Strom (A)	2,27	2,27
	H (kA/m)	38,75	38,75
Oszilloskop MSO 3034	Messpunkte	Channel 1 $1 \cdot 10^6$	Channel 2 $1 \cdot 10^6$
	Zeitbasis (sec)	10	10

Tabelle 8.1.: Messeinstellungen elektrisches Drehen

Die Winkelmessung wurde, wie weiter oben beschrieben, durchgeführt und ausgewertet. Eine Hälfte der Messung wurde mit den Markierungen an der Stelle der Winkelmessungen in Bild (8.2) dargestellt. In diesem Bild ist außerdem noch die Spulenanregung als Vergleich mit abgebildet. Die Winkelmessungen wurden an den angegebenen Positionen vorgenommen, da zu diesem Abtastzeitpunkt eine der beiden Brückenausgangssignale V_{out1} oder V_{out2}

den maximalen Amplitudenwert erreicht hat. Der maximale Amplitudenwert ist ein Spannungswert, der unabhängig von der Qualität der Messposition immer gleich bleibt. Dieser Spannungswert ist einzig von der Versorgungsspannung V_{DD} des Winkelsensors abhängig. Genauere Informationen dazu sind in [9] zu finden. Zum gleichen Abtastzeitpunkt, an dem das eine Brückenausgangssignal (z.B. V_{out1}) sein Amplitudenmaximum hat, hat die andere Brückenausgangsspannung den Nulldurchgang erreicht. An dieser Stelle kann der größte Fehler des Brückenausgangssignals auftreten. Die Gründe hierfür sind zum einen Inhomogenitäten im magnetischen Feld, oder eine geringe magnetische Feldstärke. Da ein Winkel sich aus den Informationen beider Signale V_{out1} und V_{out2} errechnet, wird an diesen Messzeitpunkten auch das für diese Messposition ungünstigste Messergebnis mit der größten Winkelabweichung erwartet.

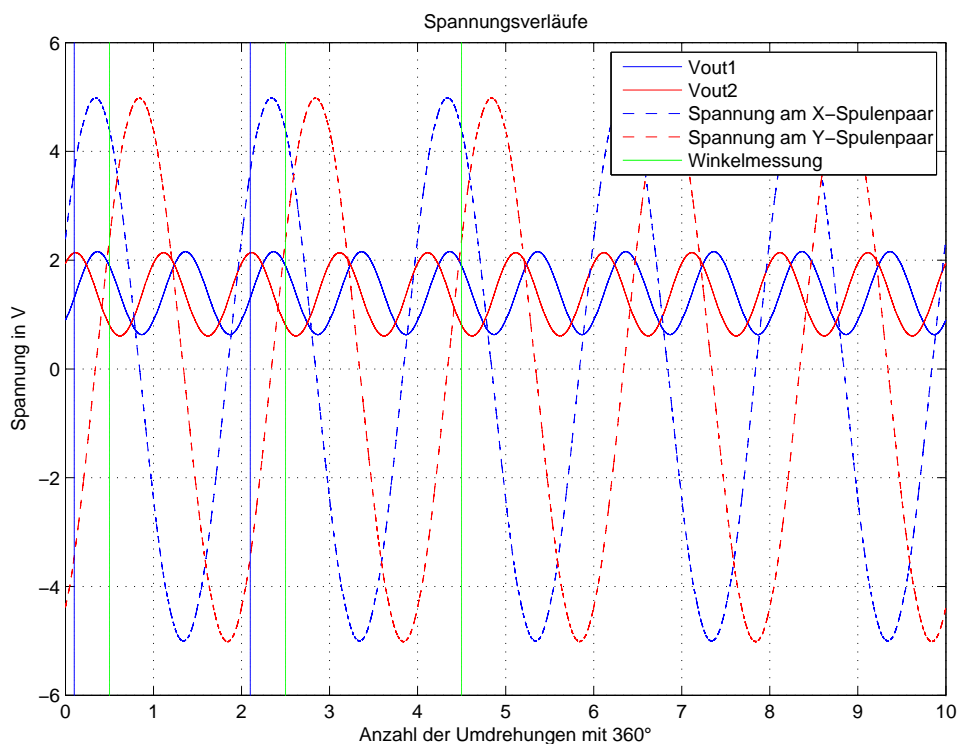


Bild 8.2.: Winkelmessung mittels elektrischem Drehens. Mit abgebildet ist die Spulenanregung (um Faktor 10 verkleinert) und die Positionen der Winkelmessungen.

Die Auswertung erfolgt in Tabelle (8.2) und (8.3). In diesen Tabellen sind die gemessenen Winkel und die jeweils größte Winkelabweichung eingetragen. Die Messungen wurden mit zwei unterschiedlichen Sensoren vom Typ KMZ60 durchgeführt. Die Sensoren bekamen die Bezeichnung Device 1 und Device 2. Die Winkelabweichungen wurden außerdem noch einmal grafisch dargestellt, im Bild (8.3) für Device 1 und Bild (8.4) für Device 2. Die Brücken-

ausgangssignale sind zuvor um den jeweiligen Offset reduziert worden.

Messung Nr.	Winkel	höchste Abweichung	RMS Abweichung	Winkel	höchste Abweichung	RMS Abweichung
1	-1,07°	0,1322°	0,0773°	44,21°	-0,07°	0,0416°
2	0,422°	0,057°	0,0356°	-44,26°	0,0852°	0,047°
3	-1,008°	0,64°	0,0312°	-0,686°	0,063	0,0405°
4	-0,3163°	0,1515°	0,0907°	-0,559°	0,098°	0,053°
5	-0,05°	0,071°	0,0416°	-0,339°	0,085	0,0567°
6	-0,314°	0,0020°	0,0129°	0,164°	-0,0255°	0,01°

Tabelle 8.2.: Messergebnisse Device 1 mit Angabe der höchsten Abweichung

Die folgende Tabelle zeigt die Messergebnisse für den Winkelsensor Device 1. Es ist deutlich zu erkennen, dass der gebaute Messplatz reproduzierbare Messergebnisse liefert. Die Schwankung der gemessenen Winkel liegt bei einigen Messpunkten über dem von NXP geforderten maximalen Winkelfehler von 0,01°, allerdings liegt die Differenz nur im Bereich einiger Prozent. Außerdem zeigt die Tabelle (8.2) die schlechteste Winkelabweichung der jeweiligen Messreihe. In Bild (8.3) lassen sich die Schwankungen der Winkeldifferenz als Ganzes betrachten.

Tabelle (8.3) zeigt die gemessenen Winkel mit Winkeldifferenz des Winkelsensors Device 2.

Messung Nr.	Winkel	höchste Abweichung	RMS Abweichung	Winkel	höchste Abweichung	RMS Abweichung
1	0,0359°	-0,0312°	0,017°	-0,5319°	0,0387°	0,0155°
2	0,2749°	0,0284°	0,0148°	-0,0659°	-0,0329°	0,0179°
3	0,3716°	-0,018°	0,0094°	0,0689°	-0,0289°	0,0127°
4	0,2383°	0,0273°	0,0185°	-0,3031°	-0,024°	0,0131°
5	0,5623°	-0,0397°	0,0182°	0,1028°	0,0406°	0,019°
6	0,3239°	0,0212°	0,0124°	0,0217°	-0,0427°	0,0169°

Tabelle 8.3.: Messergebnisse Device 2 mit Angabe der höchsten Abweichung

Auch hier kann man erkennen, dass die gemessenen Werte reproduzierbar sind. Die Methode zur Messpositionsbestimmung nach einem Wechsel des Winkelsensors sorgt dafür, dass die ideale Messposition eingenommen werden kann. Die Schwankung der gemessenen Winkel betragen hier für die schlechtesten Winkelabweichungen nur einige Prozent.

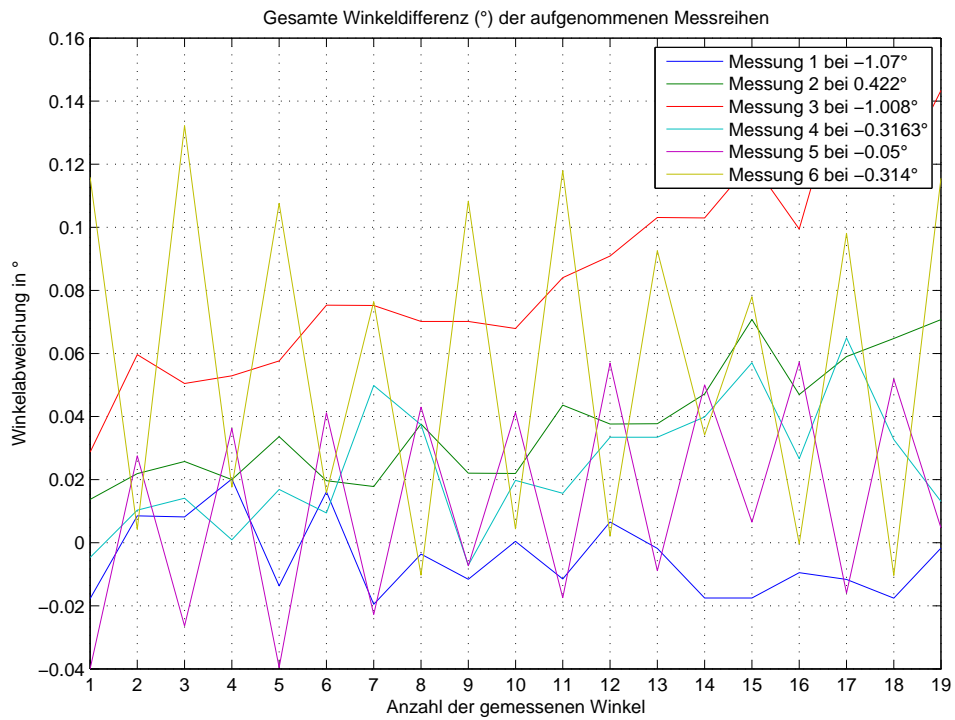


Bild 8.3.: Winkeldifferenz des 1. gemessenen Winkels bei Device 1

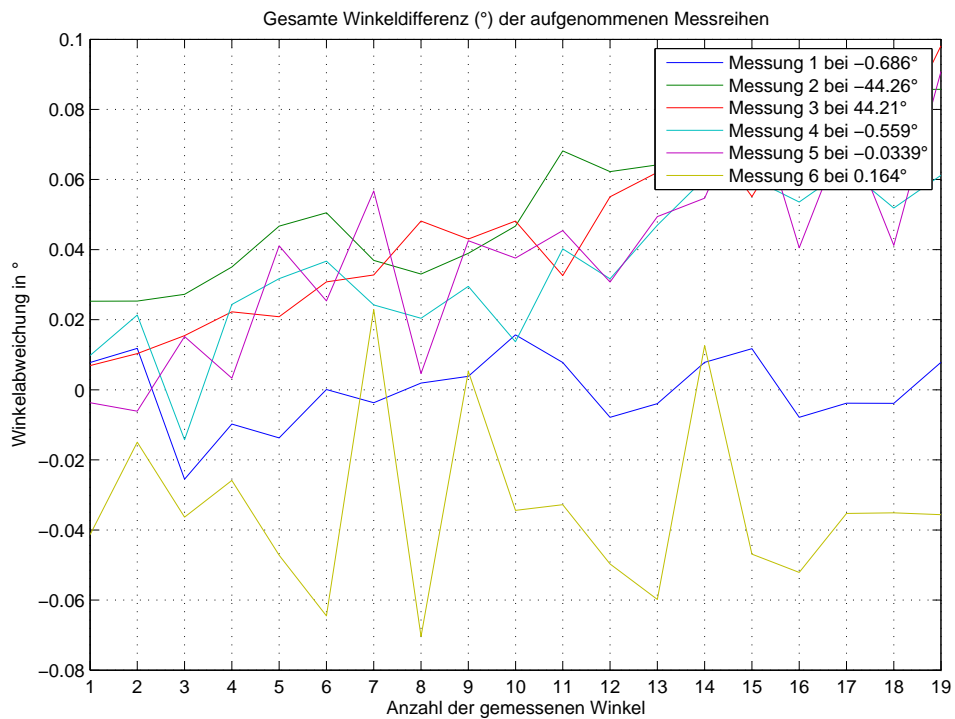


Bild 8.4.: Winkeldifferenz des 2. gemessenen Winkels bei Device 1

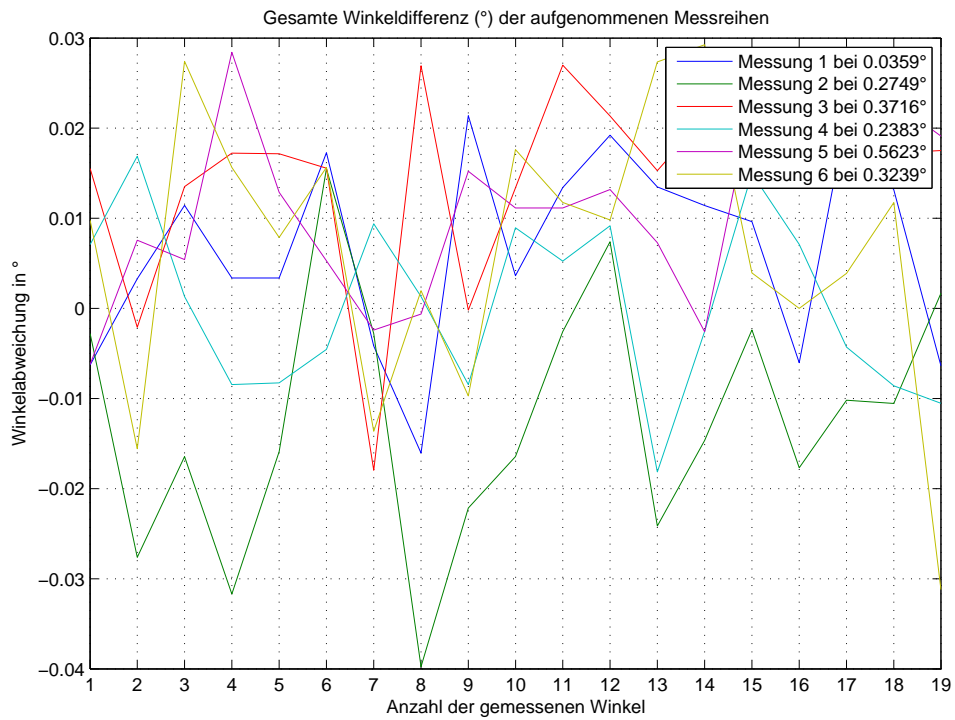


Bild 8.5.: Winkeldifferenz des 1. gemessenen Winkels bei Device 2

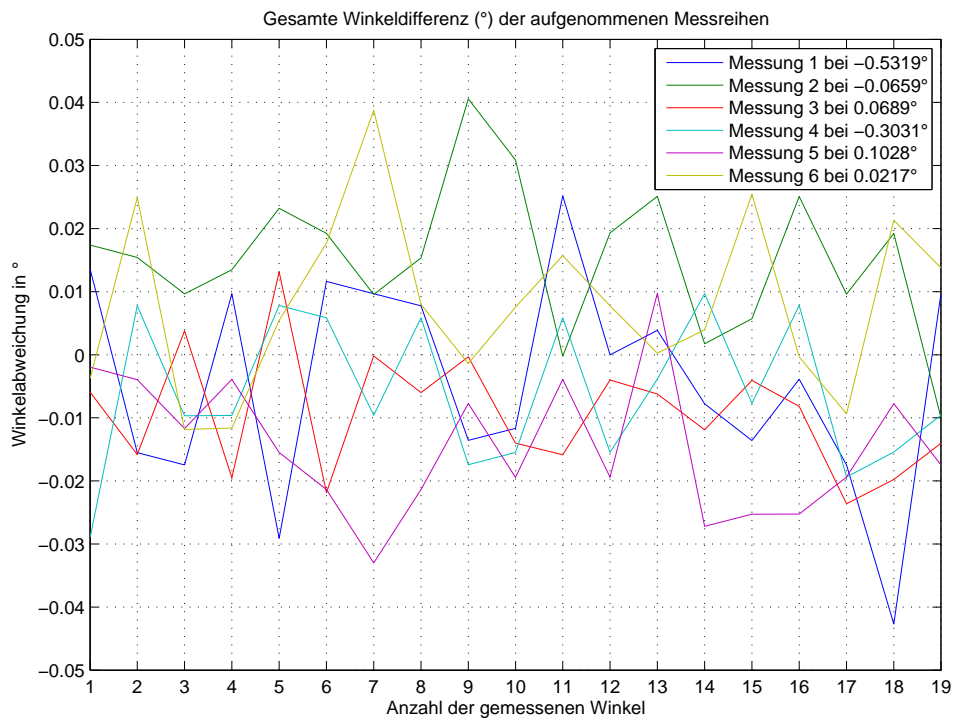


Bild 8.6.: Winkeldifferenz des 2. gemessenen Winkels bei Device 2

8.1.2. Auswertung Offset

Eine ideale Winkelmessung ist von einem kontinuierlichen Offset abhängig. Der beste Offset ist der 0 V Spannungsoffset. Die Ausgangssignale des Winkelsensors (V_{out1} oder V_{out2}) sind bestenfalls einzig mit einem Offset behaftet, welcher von der Versorgungsspannung V_{DD} und der Umgebungstemperatur des Winkelsensors abhängig ist. Der maximale Spannungswert des Offsets bei einer Temperatur von 25°-Celsius errechnet sich folgendermaßen:

$$U_{Offset} = \pm 0,07 \cdot V_{DD} \quad (8.3)$$

Um überprüfen zu können wie sich der Offset der einzelnen Brückenausgangssignale verhält, werden mittels eines M-Files die zu einer Periode gehörenden maximalen Werte und minimalen Werte erfasst. Nachdem diese Werte fest stehen, wird die Mitte der so gefundenen Amplitude errechnet. Dieser errechnete Wert stellt dann den Mittelpunkt des Sinus- bzw. Kosinussignals dar. Diese Prozedur der Null-Linien Suche wird für jede Periode der Ausgangssignale V_{out1} und V_{out2} so lange wiederholt, bis die komplette Aufzeichnungslänge ausgewertet wurde. Ist der gefundene Wert der Null-Linie von 0 V abweichend, liegt ein Offset vor. Ausgewertet wird die Kontinuität des vorhandenen Offsets. Vorher wurden die Signale V_{out1} und V_{out2} so Offsetbereinigt, dass beide Signale um eine Null-Volt-Mittellinie oszillieren. Dazu wurde die Methode der Mittelung benutzt. In Matlab gibt es den Befehl `mean()`, welcher den Durchschnittswert eines Vektors berechnet. Dazu werden alle Elemente innerhalb des Vektor addiert und durch die Anzahl der Vektorelemente geteilt. Als Ergebnis kommt der Durchschnitt der Vektorelemente heraus. Bei einem sinusförmigen Signal würde der ideale Durchschnitt 0 sein, da die Anteile der positiven Werte (eigentlich Flächen) gleich groß den Anteilen der negativen Werte sind. Ist das Signal mit einem Offset behaftet, verschiebt sich der Durchschnitt je nach Lage des Offsets ins Positive oder Negative. Dieser Offset wurde vor der Messreihenauswertung von allen Brückenausgangssignalen abgezogen.

Die folgenden Bilder zeigen die Abweichungen vom gefundenen Offset. Bild (8.7) zeigt die Analyse des Kosinussignals V_{out1} vom Device 1. Im darauf folgenden Bild (8.8) ist das Offset-Verhalten des Sinussignals V_{out2} zu finden.

Eine identische Analyse findet mit den Sinus- und Kosinus-Brückensignalen vom Device 2 statt. Zu sehen sind die Offset-Abweichungen auf den Bildern (8.9) und (8.10).

Bei näherer Betrachtung der Bilder, erkennt man, dass die höchste Offset-Abweichung um 1,1 mV vom Idealwert abweicht. Der Idealwert in jeder Bild wird als grüne Linie auf dem Wert Null der Y-Achse dargestellt. Würden die ermittelten Offset-Spannungen zu jedem

Messpunkt identisch sein, würden sie eine Parallele zu der gedachten Null-Linie darstellen oder im besten Fall mit ihr zusammenfallen. Der Großteil der erfassten Offset-Werte liegt im Bereich $-0,1 \text{ mV}$ bis $+0,1 \text{ mV}$. Auf die Gesamtamplitude der Brückenausgangssignale bezogen bedeutet das eine Abweichung von weniger als 0,01 Prozent. Es ist anzumerken, dass alle Signale vor der Analyse um einen permanent auftretenden Offset bereinigt wurden. Das bedeutet, es wurde das jeweilige Brückenausgangssignal um den Offsetbetrag verringert damit es um 0 V schwingt. Exakt die gleiche Maßnahme würde ebenfalls mit den Ausgangssignalen des Winkelsensors im Endprodukt passieren.

Eine weitere Methode um den Offset zu erfassen liegt darin, nochmals eine Durchschnittswert berechnung vom bereits Offset befreiten Brückenausgangssignals durchzuführen. Hierbei kann man aber, im Vergleich zur vorigen Auswertungsmethode, keine Rückschlüsse auf den Offset einer 360° Winkelmessung ziehen. Es wird mehr ein allgemeiner Eindruck vermittelt, ob das aufgezeichnete Sensorsignal starken Schwankungen im Offset unterliegt. Das wäre dann der Fall, wenn der errechnete Durchschnittswert stark von Null abweicht. Tabelle (8.4) zeigt die errechneten Offsetabweichungen der Messreihen an.

Device 1		Device 2			
Messung Nr.	$\sum V_{out1Off} [\text{V}]$	$\sum V_{out2Off} [\text{V}]$	Messung Nr.	$\sum V_{out1Off} [\text{V}]$	$\sum V_{out2Off} [\text{V}]$
1	$8,707^{-15}$	$-5,685^{-15}$	1	$15,656^{-15}$	$9,049^{-15}$
2	$-48,857^{-15}$	$-38,824^{-15}$	2	$11,489^{-15}$	$4,141^{-15}$
3	$-44,202^{-15}$	$-10,576^{-15}$	3	$-1,503^{-15}$	$0,422^{-15}$
4	$-12,912^{-15}$	$2,795^{-15}$	4	$13,772^{-15}$	$-8,491^{-15}$
5	$4,509^{-15}$	$-5,757^{-15}$	5	$-16,157^{-15}$	$-56,513^{-15}$
6	$-33,427^{-15}$	$11,252^{-15}$	6	$5,773^{-15}$	$-5,814^{-15}$

Tabelle 8.4.: Durchschnittlicher Offset des Device 1 (links) und Device 2 (rechts) beim elektrischen Drehen

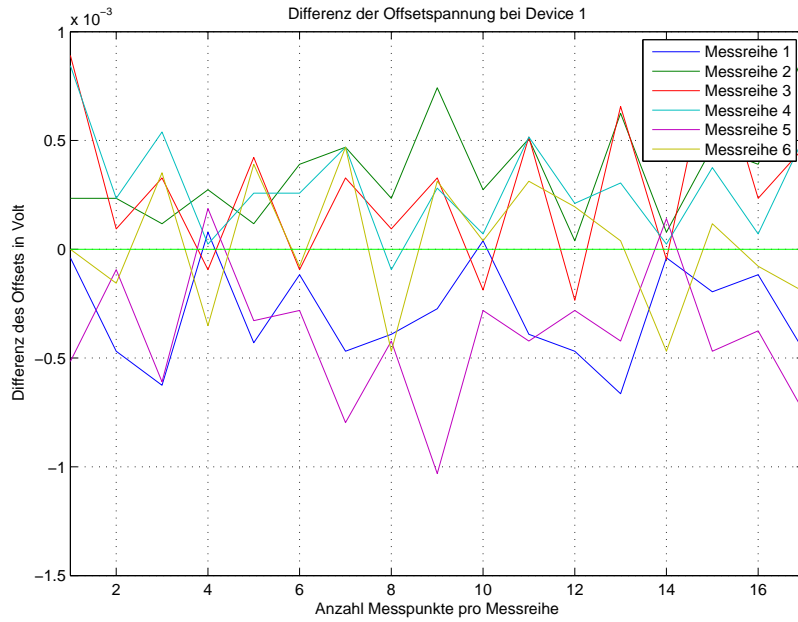


Bild 8.7.: Offsetdifferenz der Kosinusbrückenspannung V_{out1} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 1

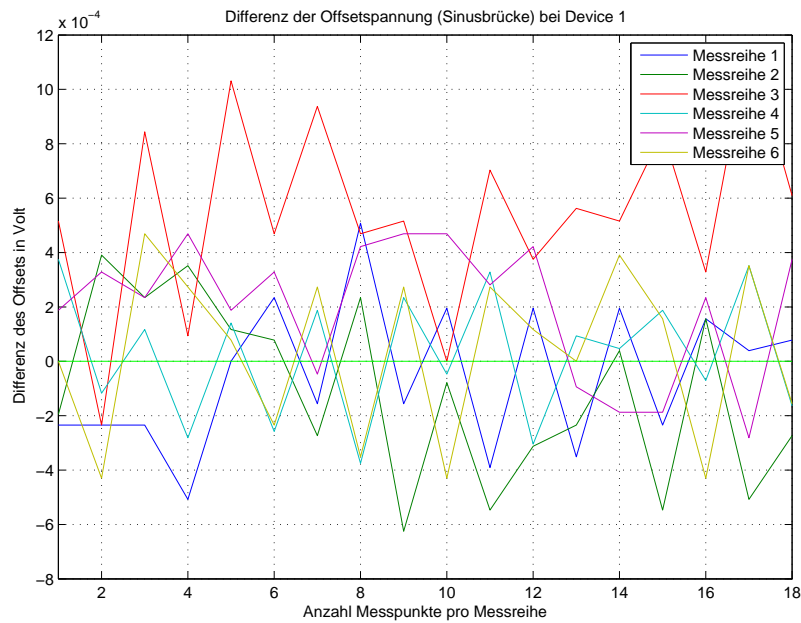


Bild 8.8.: Offsetdifferenz der Sinusbrückenspannung V_{out2} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 1

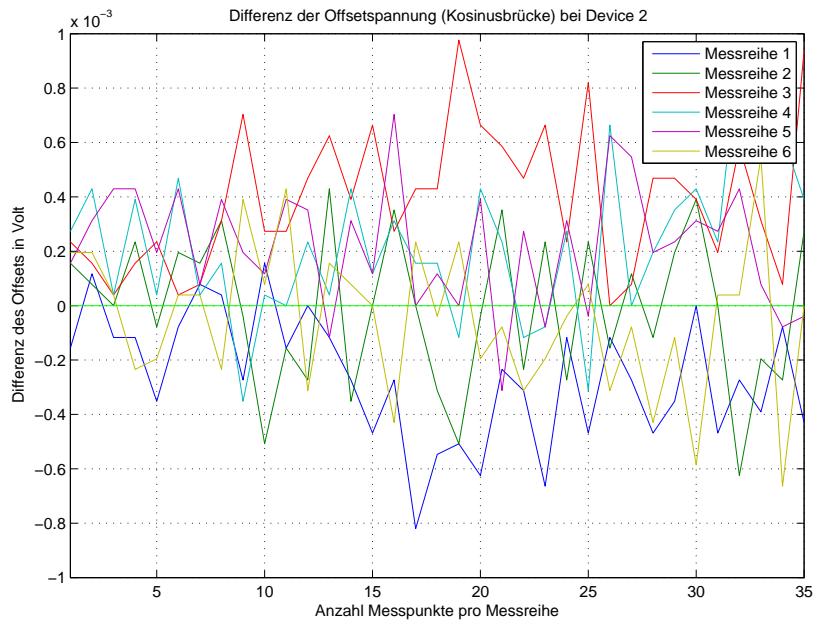


Bild 8.9.: Offsetdifferenz der Kosinusbrückenspannung V_{out1} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 2

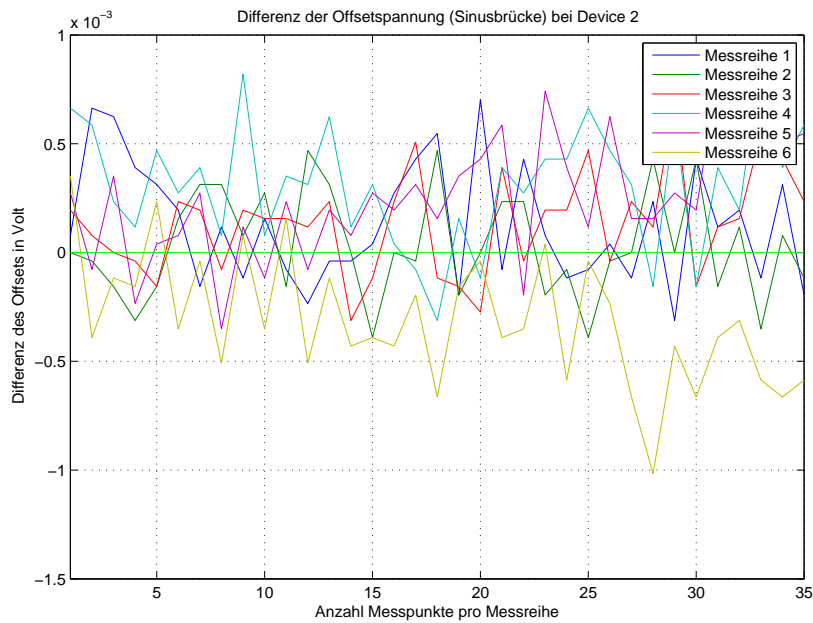


Bild 8.10.: Offsetdifferenz der Sinusbrückenspannung V_{out2} , bezogen auf 0 V. Gemessen an Device 2

8.1.3. Auswertung k-Faktor

Der k-Faktor beschreibt das Verhältnis der Amplituden zueinander. Es wird also der Spitze-Spitze-Spannungswert des Signals V_{out1} mit dem Spitze-Spitze-Spannungswert des Signals V_{out2} verglichen. Man spricht von einem k-Faktor von 1, wenn beide Spitze-Spitze Spannungswerte identisch sind. Der k-Faktor wird wie folgt berechnet:

$$k - Faktor = \frac{V_{out1PeakPeak}}{V_{out2PeakPeak}} \quad (8.4)$$

Bei einem k-Faktor <1 ist der Spitze-Spitze-Spannungswert von V_{out2} größer als der Spitze-Spitze-Spannungswert von V_{out1} . Ist der k-Faktor >1 verhält es sich genau umgekehrt.

Die Analyse des k-Faktors gestaltet sich leicht, da nur die Amplitudenwerte der einzelnen Perioden miteinander verglichen werden müssen. Eine ähnliche Auswertung wurde bereits bei der Offset Ermittlung angewandt. Bild (8.11) zeigt den Verlauf des k-Faktors beim Device 1. Zum Vergleich zeigt Bild (8.12) den k-Faktor für das Device 2.

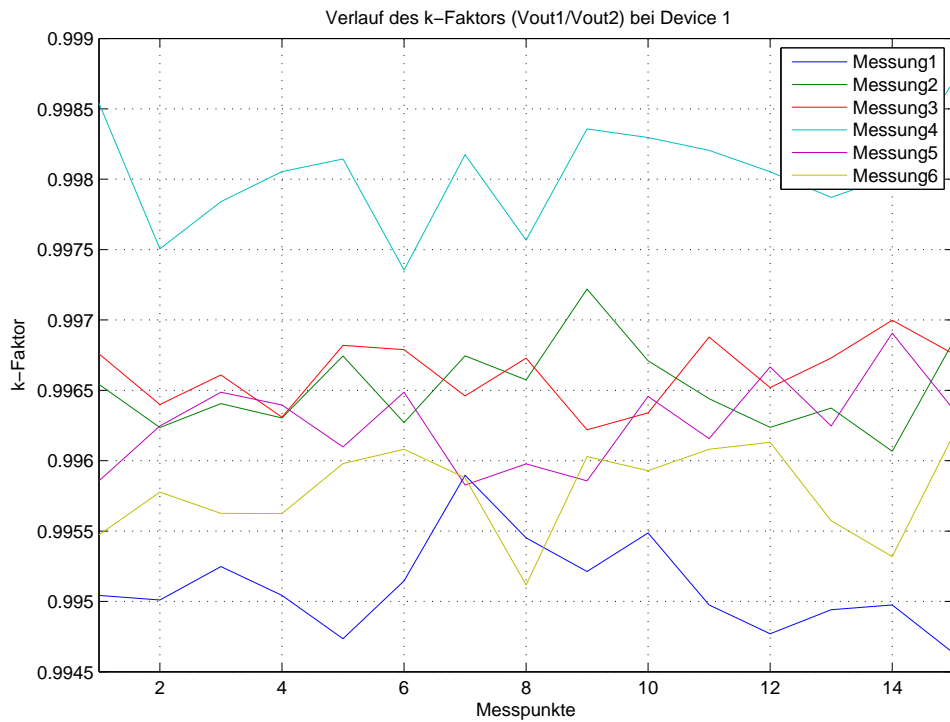


Bild 8.11.: Abweichung des k-Faktors, gemessen an Device 1

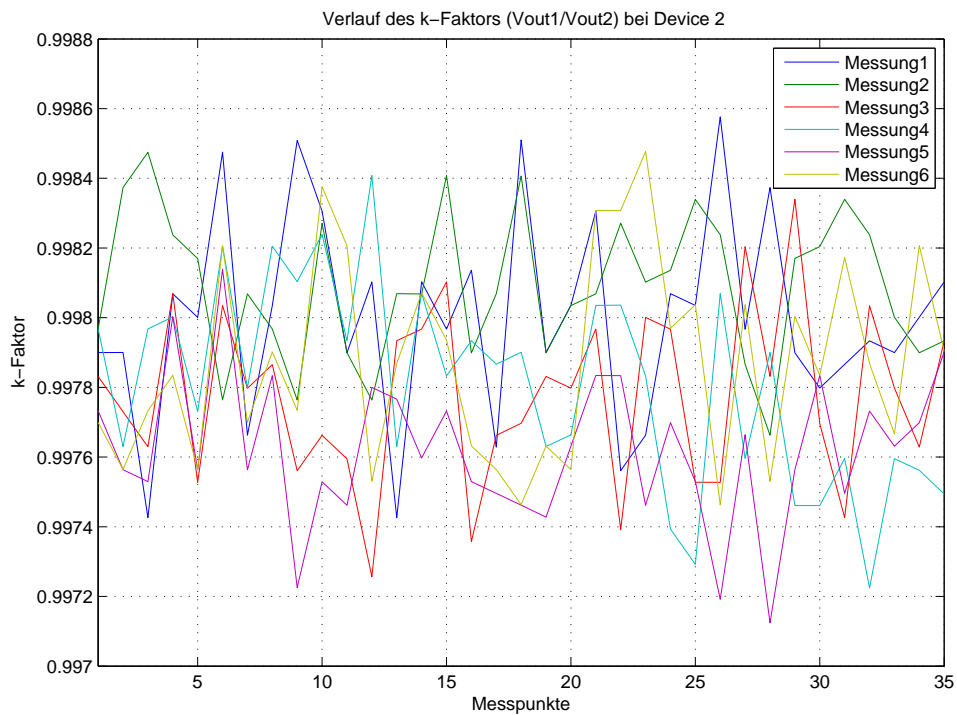


Bild 8.12.: Abweichung des k-Faktors, gemessen an Device 2

8.1.4. Auswertung Phasenverschiebung

Kenntnisse über die Phasenverschiebung sind beim Winkelsensor sehr wichtig, da eine konstante Phasenverschiebung von 90° zwischen den Signalen vorhanden sein muss. Dieses ist notwendig um eine genaue Winkelmessung zu gewährleisten. Wenn die Brückenausgangssignale, wie in Bild (5.4) gezeigt, verformt sind, wird eine solche Signalform dazu führen, dass sich die Phasenverschiebung zwischen V_{out1} und V_{out2} von 90° unterscheiden wird. Da aber die Extremwerte bei der Kotangensfunktion 90° und 45° nur erreicht werden können, wenn die Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen 90° beträgt, reduziert eine von 90° abweichende Phasenverschiebung den Messbereich des Winkelsensors.

Zur Ermittlung der Phasenverschiebung wurde folgendermaßen vorgegangen: Zuerst wurden die Positionen der maximalen Amplituden der Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} ermittelt. Diese Positionsangaben wurden benötigt, um den nachfolgenden Nulldurchgang des, um den Offset reduzierten Signals, zu ermitteln. Nachdem der Nulldurchgang beider Brückenausgangssignale ermittelt wurde, konnte aus der Differenz der beiden Nulldurchgänge die Phasenverschiebung errechnet werden.

Die Tabellen (8.5) und (8.6) geben die ermittelten maximalen Phasenverschiebungen und das quadratische Mittel der gesamten Messreihe für Device 1 und Device 2 an. In den Bildern (8.13) und (8.14) ist eine grafische Darstellung der Phasenverschiebung an Device 1 und Device 2 zu sehen.

Device 1		
Messung Nr.	maximale Phasenverschiebung	RMS der Phasenverschiebung
1	$90,94^\circ$	$90,78^\circ$
2	$90,72^\circ$	$90,59^\circ$
3	$91,08^\circ$	$90,9^\circ$
4	$91,19^\circ$	$90,99^\circ$
5	91°	$90,82^\circ$
6	$90,93^\circ$	$90,72^\circ$

Tabelle 8.5.: Maximale Phasenverschiebung und quadratisches Mittel der Messreihen von Device 1

Device 2		
Messung Nr.	maximale Phasenverschiebung	RMS der Phasenverschiebung
1	90,58°	90,45°
2	90,59°	90,46°
3	90,3°	90,46°
4	90,59°	90,43°
5	90,59°	90,45°
6	90,62°	90,49°

Tabelle 8.6.: Maximale Phasenverschiebung und quadratisches Mittel der Messreihen von Device 2

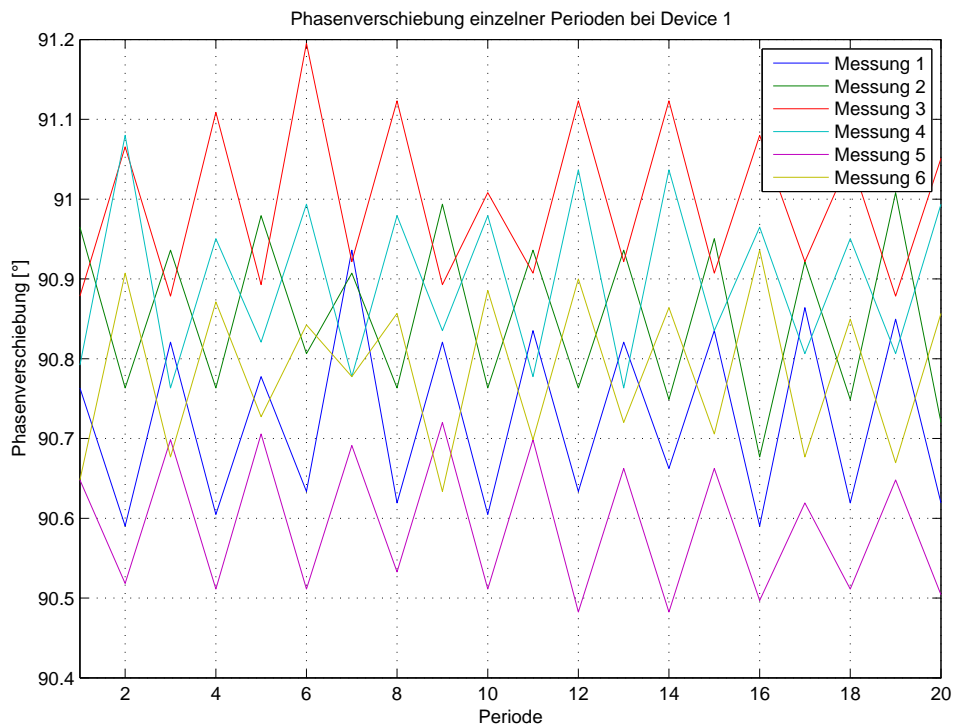


Bild 8.13.: Abweichung der Phasenverschiebung, gemessen an Device 1

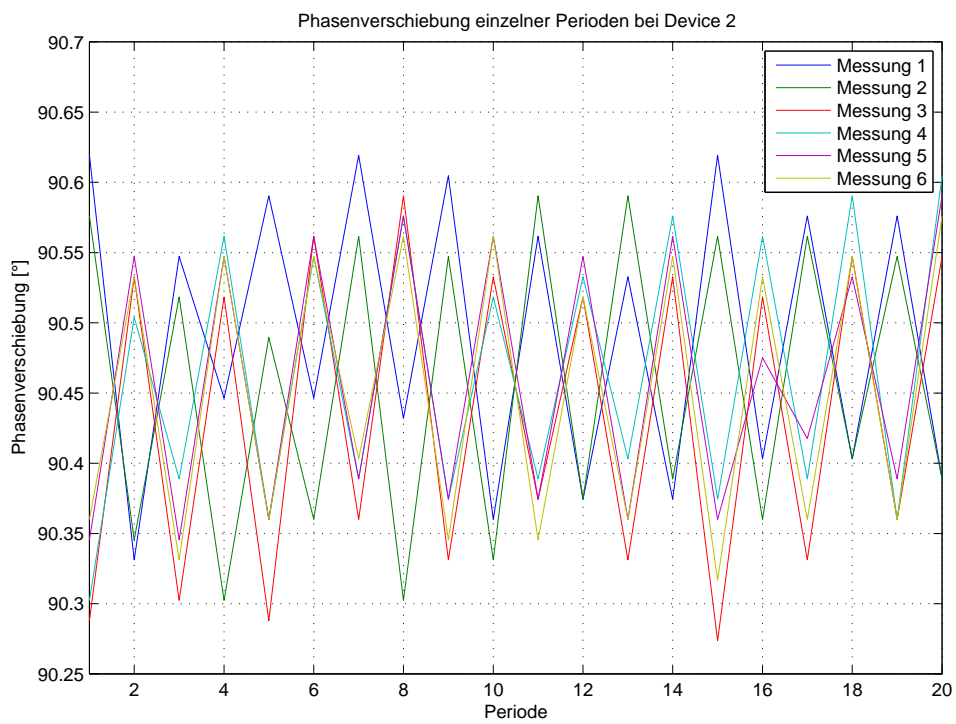


Bild 8.14.: Abweichung der Phasenverschiebung, gemessen an Device 2

8.2. Ergebnisse des mechanischen Drehens

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Auswertung der Messreihen des mechanischen Drehens. Die Methode des mechanischen Drehens hat einen entscheidenden Unterschied zum elektrischem Drehen. Hier findet die Winkeländerung im magnetischen Feld um den Winkelsensor nicht durch die unterschiedliche Spulenanregung statt, sondern der gesamte Kreuzspulenkasten wird mittels des Drehmesstisches DMT65 um den Sensor gedreht. Die Unterschiede in den Geräteeinstellungen und der Messeinstellungen sind in Tabelle (8.7) dargestellt.

Gerät	Einstellung	Einstellungswert 1	Einstellungswert 2
konstante Spannungsquelle	Spannung (V)	X-Spulen 10	Y-Spulen 10
	Phase (°)	0	0
	Frequenz (Hz)	0	0
KepCos BOP36-5M	Verstärkung	3,4	3,4
	Widerstand ($k\Omega$)	13,6	13,6
Großfeld- spulenkasten	Beschaltung d. Spulen	X-Spulen parallel	Y-Spulen parallel
	Versorgungsspannung (V)	34	34
	Strom (A)	1,6	1,6
	H (kA/m)	27,8	27,8
Oszilloskop MSO 3034	Messpunkte	Channel 1 $1 \cdot 10^6$	Channel 2 $1 \cdot 10^6$
	Zeitbasis (sec)	40	40
Fluke 45 Multimeter	Messbereich (V)	V_{out1} 9,9999	V_{out2} 9,9999

Tabelle 8.7.: Messeinstellungen mechanisches Drehen

Da bei der Methode des mechanischen Drehens der Kreuzspulenkasten um den Winkelsensor gedreht wird, muss dafür Sorge getragen werden, dass die nötigen Versorgungskabel für die Spulen und die Kühlung eine ausreichende Länge besitzen. Hier wird ebenfalls versucht, mehrere Perioden Umdrehung um den Winkelsensor zu messen, um so einen Klirrfaktor bestimmen zu können. Anhand des Klirrfaktors soll auch hier eine Aussage über die Messposition des Winkelsensors getroffen werden. Es stellte sich heraus, dass der Klirrfaktor an der gefundenen Messposition etwas höher ausfiel als an der gefundenen Messposition mittels elektrischen Drehens. Der Klirrfaktor betrug bei allen durchgeführten Messungen um die -2 dB (84 Prozent).

Trotz verlängerter Zuleitungen kann nur eine maximale Anzahl von 8 Perioden (4 volle Umdrehungen des Drehmesstisches) erreicht werden. Die dafür benötigte Leitungslänge von 6 m wird dabei um den Kreuzspulenkasten gewickelt. Diese Winkelmessungen mit vollen Umdrehungen werden mittels Oszilloskop aufgezeichnet und anschließend über Matlab ausgewertet. Da durch die deutlich erhöhte Länge der Zuleitungen auch ein höherer Spannungsabfall auf den Leitungen auftritt, wird direkt vor den Spulen des Kreuzspulenkastens eine Strommessung durchgeführt. Diese Strommessung soll sicher stellen, dass ein genügend großer Strom zur Magnetfelderzeugung durch die Spulen fließt.

Anhand der Messreihen, in denen volle Umdrehungen durchgeführt wurden, wird eine Aussage über die Messposition im statischen Magnetfeld getroffen. Diese Messreihen dienen außerdem dazu Aussagen über den k-Faktor, den Offset und der Phasenverschiebung zu treffen. Die Winkelmessungen werden durch eine andere Methode ausgewertet. Hier wird mittels des Drehmesstisches DMT65 ein bestimmter Winkel angesteuert und dieser muss vom Winkelsensor erkannt werden.

8.2.1. Auswertung Winkelmessungen

Eine Auswertung der Winkelmessung, wie es beim elektrischen Drehen erfolgte, findet hier nicht statt. Da die Anzahl der aufgezeichneten Perioden unter 10 liegt, wird hier auf Grund mangelnder Aussagekraft auf diese Art der Winkelmessung verzichtet.

Die Winkelmessung beim mechanischen Drehen erfolgt durch eine Winkelvorgabe durch den Drehmesstisch DMT65. Hierzu wird der Drehmesstisch in eine bestimmte Richtung vorgespannt. Dieses Vorspannen dient zur Minimierung eines möglichen Fehlers, hervorgerufen durch das Umkehrspiel der mechanischen Komponenten des Drehmesstisches.

Nun wird ein bestimmter Winkel vorgegeben, welcher vom Drehmesstisch durchfahren wird. In den Tabellen (8.8) und (8.9) kann entnommen werden, welche Winkel angefahren wurden und welche Winkeländerungen vom Winkelsensor KMZ60 erfasst wurden. Zu Beginn der Messreihe wurde der Startwinkel, welcher der Winkelsensor im magnetischen Feld ermittelt hat, notiert. Anschließend wurde mittels DMT65 um $+5^\circ$ (im Uhrzeigersinn) verfahren. Nachdem der Drehmesstisch die neue Position angefahren hat, wurde der neue Winkel des Winkelsensors ermittelt und verglichen. Danach wird weiter gedreht um die Winkel $+3^\circ$, $+2^\circ$, $+1^\circ$ und $+0,5^\circ$.

Es wurde darauf verzichtet um größere Winkelbeträge zu verfahren. Der Grund hierfür liegt darin, dass die geforderte Genauigkeit von einem Fehlerwinkel kleiner $0,1^\circ$ für große Winkel,

Device 1						
V_{out1} [V] - Offset 2,0112 V	-0,0377	-0,2376	-0,3577	-0,4362	-0,4747	-0,4903
V_{out2} [V] - Offset 1,9838 V	-1,2299	-1,2111	-1,1822	-1,1558	-1,1404	-1,132
berechneter Winkel [°]	44,1221	39,4502	36,5828	34,6617	33,7001	33,2097
Winkeländerung DMT65 [°]	0	+5	+3	+2	+1	+0,5
Winkel KMZ60 [°]	0	4,6719	2,8673	1,9211	0,9617	0,4903
Abweichung in Prozent	0	-6,5612	-4,422	-3,944	-3,834	-1,938

Tabelle 8.8.: Device 1, Winkelmessungen mit Drehmesstisch DMT65 im Bereich zwischen $0,5^\circ$ bis 5°

als auch für kleine Winkel gelten muss. Da die Anforderung also für alle Winkel gilt, wurde sich bei den Winkelmessungen mit mechanischen Drehen nur auf kleine Winkeländerungen konzentriert. Eine tiefer gehende Auswertung der Messungen findet am Ende des Kapitels statt.

Device 2						
V_{out1} [V] - Offset 2,011 V	-0,1631	-0,3625	-0,4779	-0,5518	-0,5877	-0,6055
V_{out2} [V] - Offset 1,984 V	-1,2221	-1,1805	-1,1388	-1,1045	-1,0855	-1,0755
berechneter Winkel [°]	41,1991	36,4648	33,6173	31,7268	30,7842	30,3104
Winkeländerung DMT65 [°]	0	+5	+3	+2	+1	+0,5
Winkel KMZ60 [°]	0	4,7343	2,8475	1,8905	0,9426	0,4738
Abweichung in Prozent	0	-5,314	-5,0833	-5,475	-5,74	-5,24

Tabelle 8.9.: Device 2, Winkelmessungen mit Drehmesstisch DMT65 im Bereich zwischen $0,5^\circ$ bis 5°

8.2.2. Auswertung Offset

Wie beim elektrischen Drehen, so ist auch beim mechanischen Drehen ein konstanter Offset wichtig. Zu Beginn der Messreihenauswertung wurden die Brückenausgangssignale um die vorhandene Offset-Spannung reduziert. Die folgende Auswertung des Offsets, welcher jetzt Null betragen muss, konzentriert sich darauf zu überprüfen wie groß der verbleibende Offset ist. Diese Überprüfung erfolgt durch Aufsummieren der Spannungswerte der einzelnen Abtastpunkte. Wie bereits genauer im Abschnitt 8.1.2 erklärt, muss bei konstantem Offset die Summe Null sein. Gibt es während der aufgezeichneten Messreihe Spannungsunterschiede im Offset, werden sich diese durch eine Summe ungleich Null bemerkbar machen.

Auf eine grafische Auswertung des Offsets wurde an dieser Stelle verzichtet, da zu wenig Perioden zur Auswertung zur Verfügung stehen. Die Tabellen (8.10) und (8.11) geben die ermittelten Spannungen des verbliebenen Offsets der Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} an. Eine genaue Auswertung erfolgt auch hier im Anschluss in Abschnitt 8.3.

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
V_{out1} - Offset [$V \cdot 10^{-8}$]	-2,56	-5,71	-75,12	1,76	5,12	-2,67
V_{out2} - Offset [$V \cdot 10^{-8}$]	63,01	-2,91	56,31	38,2	-3,88	18,31

Tabelle 8.10.: Device 1, Offset der Brückenausgangssignale

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
V_{out1} - Offset [$V \cdot 10^{-8}$]	-9,03	-5,05	-3,08	2,23	-1,14	-80,14
V_{out2} - Offset [$V \cdot 10^{-8}$]	-3,01	3,3	5,21	-3,32	14,53	-2,64

Tabelle 8.11.: Device 2, Offset der Brückenausgangssignale

8.2.3. Auswertung k-Faktor

Auch bei den Messreihen des mechanischen Drehens wird der k-Faktor ausgewertet. Wie bereits erwähnt, ist eine Übereinstimmung in der Amplitude bei beiden Brückenausgangsspannungen nicht nur wünschenswert, sondern für genaue Winkelmessungen unabdingbar.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des k-Faktors ist analog zur verwendeten Methode zur Ermittlung des k-Faktors beim elektrischen Drehen. Es werden die Minima und Maxima einer Periode für beide Brückenausgangssignale ermittelt und miteinander verglichen. Bezogen werden die Ergebnisse auf das Signal V_{out1} . Die Ergebnisse für das Device 1 und Device 2 sind in der folgenden Tabelle (8.12) zu finden. Auch hier erfolgte keine grafische Auswertung der einzelnen k-Faktoren, wie bei der Auswertung der Messreihen des elektrischen Drehens, da eine zu geringe Anzahl von Messpunkten zur Verfügung stand. Eine Auswertung in Bezug auf die Winkelmessung erfolgt im letzten Abschnitt dieses Kapitels.

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
Device 1 - <i>k - Faktor_{RMS}</i>	0,9975	0,9960	0,9955	0,9944	0,9937	0,9943
Device 2 - <i>k - Faktor_{RMS}</i>	0,9973	0,9978	0,9976	0,9979	0,9974	0,9973

Tabelle 8.12.: K-Faktor für Device 1 und 2. Dargestellt ist der RMS-Wert der Amplituden der Brückenausgangssignale.

8.2.4. Auswertung Phasenverschiebung

Die Probleme, welche eine Phasenverschiebung einer Winkelmessung bereitet die nicht exakt 90° ist, wurden bereits im Abschnitt 8.1.4 genauer erläutert. Außerdem wurde bereits in Kapitel 3.4.3 genauer über Winkel fehlmessungen in Folge von einer Phasenverschiebung ungleich 90° berichtet.

Die Auswertung erfolgte auch hier analog zur Auswertung der Phasenverschiebung beim elektrischem Drehen. Der einzige Unterschied in der Auswertung wurde in Bezug auf die Frequenz einer vollen Umdrehung gemacht, da eine Periode beim mechanischen Drehen in etwa 40 mal so lang ist, wie eine Periode beim elektrischen Drehen. Dieser Umstand sorgt auch in dieser Auswertung dafür, dass auf eine grafische Darstellung der Messergebnisse verzichtet wird. Die ermittelten Phasenverschiebungen der einzelnen Perioden beim mechanischen Drehen sind in den Tabellen (8.13) und (8.14) zu sehen. Auch hier ist eine Phasenverschiebung von 90° wünschenswert, um die Winkelmessungen im statischen Magnetfeld so genau wie möglich durchführen zu können.

Eine genaue Auswertung erfolgt auch hier wieder im Abschnitt 8.3.

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
maximale Phasenverschiebung [°]	86,71	87,11	83,37	95,47	84,08	94,48
Mittelwert (RMS) Phasenverschiebung	88,03	87,97	84,72	94,67	85,28	93,57

Tabelle 8.13.: Device 1, maximaler Wert und RMS-Mittelwert der Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
maximale Phasenverschiebung [°]	88,41	87,66	85,61	85,89	85,07	92,05
Mittelwert (RMS) Phasenverschiebung	89,37	88,87	86,08	87,01	85,54	90,47

Tabelle 8.14.: Device 2, maximaler Wert und RMS-Mittelwert der Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen

8.3. Gesamtauswertung der Messdaten

In diesem letzten Abschnitt wird ein Fazit aus den Messreihen gezogen. Im Abschluss soll hinsichtlich der Ergebnisse der Winkelmessungen und deren Genauigkeit eine Aussage über die Funktionalität des Messplatzes getroffen werden.

Winkelmessungen im rotierenden magnetischen Feld

Die Winkelmessungen an der gefundenen Messposition im rotierenden Magnetfeld zeigen insgesamt zufriedenstellende Resultate. Die Methode der zwei Winkelmessungen pro Periode und die zugehörigen Ergebnisse der jeweiligen Messreihen zeigen, dass der Messplatz reproduzierbare Ergebnisse liefert. Dieses erkennt man daran, dass die gemessenen Winkel kaum Unterschiede zu den erwarteten Winkeln aufwiesen. Der größte aufgetretene Winkelfehler beim ersten Winkelsensor (Device 1), betrug $0,1515^\circ$. Dieser Wert liegt zwar $0,05^\circ$ über dem angegebenen maximalen Winkelfehler [9] für den Winkelsensor KMZ60, da aber die maximalen Winkelabweichungen der anderen Messreihen unter $\pm 0,1^\circ$ liegen, ist eine Winkelmessung auf diese Art möglich. Bei Betrachtung der mittleren Winkelabweichungen stellt man fest, dass die Spezifikation des KMZ60 eingehalten wird.

Selbst nach einem vollzogenen Wechsel des Winkelsensors und der damit verbundenen erneuten Suche der Messposition, stellt sich beim zweiten Winkelsensor (Device 2) ein ähnliches Resultat der Winkelmessungen ein. Der größte Winkelfehler der beim Device 2 auftrat hatte eine Winkelabweichung von $-0,0427^\circ$. Diese liegt sogar unter dem angegebenen Winkelfehler von $0,1^\circ$ für den KMZ60. Bei Betrachtung der gemittelten Abweichung² wird das Ergebnis bestätigt. Der relativ³ auf den gemessenen Winkel bezogene Winkelfehler wird hier nicht weiter betrachtet.

Die Auswertung der restlichen Messgrößen k-Faktor, Offset und Phasenverschiebung ergibt ähnlich gute Resultate wie die Winkelmessung. Mit einer Spannung in der Größenordnung von 10^{-15} Volt (rechnerisch) in der gemittelten Auswertung verläuft der Offset konstant. Schwankungen konnten nicht ermittelt werden. Diese Aussage wird auch durch die grafische Auswertung der Offset-Spannung einzelner Perioden, siehe die Abbildungen (8.7) bis (8.10), bestätigt. Mit einer durchschnittlichen Abweichung von $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ V, also weniger als einem halben mV, kann die Offset-Spannung zu jedem Abtastpunkt einer Periode als konstant angesehen werden.

²Das Mittel der Abweichung wurde durch die quadratische Abweichung (auch RMS genannt) berechnet.

³Gemeint ist die prozentuale Winkelabweichung bezogen auf den gemessenen Winkel.

Der k-Faktor weist bei beiden untersuchten Winkelsensoren, Device 1 und Device 2, ungefähr gleiche Werte auf. Ein k-Faktor von 1 würde bedeuten, dass die Amplituden der Signale V_{out1} und V_{out2} identisch sind. Die Auswertung der Messreihen für den ersten Winkelsensor (Device 1) zeigt, dass der k-Faktor zwischen 0,9945 und 0,9985 schwankt. Auffällig ist bei den untersuchten Messungen, dass die erste Messreihe den schlechtesten k-Faktor aufweist, während die vierte Messreihe über den besten k-Faktor verfügt. Dieses könnte mit dem Einfluss der Temperatur auf die Spulen zusammen hängen. Alle anderen Messreihen liegen um den Wert 0,9965. Die größte Abweichung bei der ersten Messreihe besitzt aber noch eine Übereinstimmung in den Amplituden von 99,45 Prozent⁴. Das ist knapp ein halbes Prozent Abweichung und das nicht durchgehend, sondern nur bei wenigen Perioden. Da laut Hersteller NXP die Brückenausgangsspannungen V_{out1} und V_{out2} zwischen $0,4 \cdot V_{DD}$ und $0,7 \cdot V_{DD}$ ⁵, bei 25°C schwanken kann [9], ist eine Abweichung im k-Faktor von knapp 0,5 Prozent eine geringe Schwankung. Beim zweiten Winkelsensor (Device 2) liegt die Streuung des k-Faktors enger beisammen. Der k-Faktor der Messreihen eins bis sechs liegt im Bereich 0,9972 bis 0,9986. Der k-Faktor ist beim Device 2 etwas einheitlicher als es beim Device 1 der Fall ist. Auch hier kann die Aussage getroffen werden, dass der k-Faktor als konstant angesehen werden kann.

Als letztes wird die Phasenverschiebung betrachtet. Die Vorgabe der Phasenverschiebung beträgt 90°. Um die Phasenverschiebung feststellen zu können wurden die Messreihen als erstes auf die Position der maximalen Amplitudenwerte untersucht. Nachdem diese Position fest stand wurde der erste negative Wert nach dem Nulldurchgang des Signals gesucht. Anschließend wurden diese Positionen des Nulldurchgangs der beiden Brückenausgangssignale miteinander verglichen und mittels dieser Methode die Phasenverschiebung bestimmt. Die maximal Phasenverschiebung, welche beim Device 1 festgestellt werden konnte, betrug 91,19°. Dieses bedeutet eine Abweichung von 1,19°. Wie bereits in Kapitel 3.4 erwähnt, folgt aus einer Abweichung von $1^{\circ, Phase}$ in der Phasenverschiebung, ein maximaler Winkelfehler von 0,5° (siehe hierzu Formel 3.13). Im quadratischen Mittel lag die Phasenverschiebung aller Messreihen zwischen 90,6° und 91°. Dies bedeutet einen möglichen Winkelfehler von 0,3° bis 0,5°. Die Messungen mit dem zweiten Winkelsensor (Device 2) ergaben eine maximale Phasenverschiebung von 0,62°. Im quadratischen Mittel lag die Phasenverschiebung aller Messreihen zwischen 90,43° und 90,49°. Daraus folgt ein durchschnittlicher Winkelfehler von 0,225°. Die grafische Darstellung der Phasenverschiebung bestätigt die eben getroffenen Auswertungen. Es zeigt sich, dass eine Phasenverschiebung vorhanden ist. Diese könnte eine mögliche Fehlerursache für Winkelabweichungen darstellen.

⁴Hiebei wird angenommen das ein k-Faktor von 1, einer Übereinstimmung der Amplituden von 100 Prozent entspricht.

⁵Dies entspricht einer Schwankung von bis zu 60 Prozent, bezogen auf die Versorgungsspannung.

Obwohl mit der Winkelmessung keine Winkel direkt gemessen werden können, in dem Sinne das um einen vorher definierten Winkel verfahren wird und dieser messtechnisch vom KMZ60 erfasst wird, kann eine Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Die geringe Abweichung der periodisch ermittelten Winkel, stimmt mit der Auswertung der Randbedingungen überein. An der durch Harmonischen Analyse gefundenen Messposition herrschen konstante Randbedingungen, gegeben durch konstante Messwerte beim k-Faktor, dem Offset und der Phasenverschiebung. Die Abweichungen zwischen den beiden gemessenen Winkelsensoren lassen sich durch Temperatureinflüsse der Spulen und genaueres Anfahren der bestimmten Messposition erklären. Es kann daher die Aussage getroffen werden, dass hier eine Methode vorhanden ist, welche die Möglichkeit bietet viele 360° Messungen durchzuführen. Anhand der so gewonnen Messdaten kann eine Aussage über den verwendeten Winkelsensor hinsichtlich reproduzierbarer Messdaten gegeben werden. Leider eignet sich diese Methode nicht dazu, bestimmte Winkel direkt zu durchfahren und auf Grund dieser bestimmten Winkelmessungen eine Aussage über die Qualität des Winkelsensors zu treffen. Auch eignet sich diese Messmethode nicht, um den Winkelsensor über seine Spezifikationen hinaus zu testen. So stellen die Spulen einen limitierenden Faktor dar. Bei steigender Frequenz begrenzen die Spulen den Strom. Alle Messungen wurden mit 2 Hz durchgeführt. Der Winkelsensor KMZ60 ist jedoch in der Lage Winkelmessungen in rotierenden magnetischen Feldern mit 25000 RPM zu leisten [9].

Winkelmessungen im statischen magnetischen Feld

Bei den Messungen im statischen Magnetfeld, mit Winkeländerung hervorgerufen durch einen Drehmesstisch, ergeben sich erhebliche Unterschiede zu den Messungen im rotierenden Magnetfeld. Im Unterschied zum rotierenden Magnetfeld werden nun vorgegebene Winkel angefahren und sollen vom Winkelsensor erfasst werden. Dieses Verfahren wurde zunächst mit dem Winkelsensor Device 1 praktiziert. Es wurde dabei festgestellt, dass der Winkelsensor bei keiner Winkelmessung den vom Drehmesstisch DMT65 vorgegebenen Winkel erfassen konnte. Die Winkelfehlmessungen lagen im Bereich von $0,33^\circ$ Abweichung bis hin zur kleinsten Winkelabweichung von $0,01^\circ$. Die größten Winkelfehlmessungen wurden dabei beim Verfahren vom größten Winkel festgestellt. Prozentual, auf den Winkel betrachtet, ergaben sich Abweichungen zwischen 6,5 und 2 Prozent.

Die Winkelmessungen mit dem Winkelsensor Device 2 ergaben ähnliche Resultate. Bei keiner Messung wurde der vorgegebene Winkel vom Winkelsensor korrekt erfasst. Die Winkelmessungen mit dem Device 2 ergaben Winkelfehlmessungen von $0,3^\circ$ bis $0,03^\circ$. In Prozenten betrachtet lag die Winkelfehlmessung zwischen 5 und 5,7 Prozent Abweichung.

Sucht man nach dem Ursprung dieser erfassten Winkelfehler, muss eine Untersuchung der anderen Messgrößen erfolgen. Als erstes wird das Verhalten der Offset-Spannung,

der beiden Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} , betrachtet. Der Verlauf des Offsets scheint wenig anders zu sein als der Verlauf des Offsets beim elektrischen Drehen. Einziger Unterschied ist hier der leicht erhöhte Durchschnittswert der Offset-Spannung. Mit einem durchschnittlichen Offset im Bereich von $\pm 30 \cdot 10^{-8}$ Volt liegt der Offset zwar um das Doppelte höher als in der Vergleichsmessung mit elektrischem Drehen, ist aber immer noch klein genug um als konstant angenommen zu werden. Der Offset vom Device 1 und Device 2 weist kaum Unterschiede auf.

Der ermittelte k-Faktor der einzelnen Messungen gibt ebenfalls wenig Aufschluss in Bezug auf den hohen Winkelfehler bei den durchgeführten Messungen. Der Mittelwert des k-Faktors liegt, für den Winkelsensor Device 1, im schlechtesten Messergebnis bei 0,9937. Dies entspricht 99,37 Prozent Amplitudenübereinstimmung der Brückenausgangssignale. Ähnliche Ergebnisse wurden mit dem Winkelsensor Device 2 erzielt. Hier lag der schlechteste Durchschnittswert bei 0,9973. Was einer Übereinstimmung der Amplituden von 99,73 Prozent entspricht. Wie schon bei den Messergebnissen vom elektrischen Drehen festgestellt wurde, liegen diese Abweichungen beim k-Faktor innerhalb der Grenzen, welche in der Spezifikation angegeben werden.

Bei der Untersuchung der Phasenverschiebung stellt man beim Device 1 fest, dass der erwartete Wert von 90° nur selten erreicht wird. Stattdessen ist eine breite Streuung der Phasenverschiebung festzustellen. Die Phasenverschiebung stellt sich zwischen 85° und 95° , im Durchschnitt, ein. Die maximalen Abweichungen einzelner Messreihen weichen sogar noch etwas stärker von den erwarteten 90° Phasenverschiebung ab. Hier lag der Wert zwischen $83,3^\circ$ und $95,5^\circ$. Im Vergleich dazu liegen die Abweichungen beim Winkelsensor Device 2 ähnlich. Von den geforderten 90° Phasenverschiebung stellt sich im Durchschnitt ein Wert von 86° bis $90,5^\circ$ ein. Die Abweichung in der Phasenverschiebung ist beim Device 2 etwas geringer als beim Device 1, trotzdem sind diese Abweichungen im Vergleich zu den Ergebnissen des elektrischen Drehens um teilweise das 10-fache größer. Bezogen auf die Phasenverschiebung vom Device 1, mit 85° bis 95° Phasenverschiebung, bedeuten 5° Abweichung in der Phasenverschiebung einen möglichen Winkelfehler von $2,5^\circ$.

Betrachtet man in den Tabellen (8.8) und (8.9) die Spannungswerte der Messbrückenausgänge V_{out1} und V_{out2} , stellt man fest, dass die Messungen in der näheren Umgebung des Nulldurchgangs vom Signal V_{out1} durchgeführt wurden. An dieser Stelle ist die Phasenverschiebung besonders hoch, da an der Stelle des Nulldurchgangs eines Signals der Fehler im Signalverlauf am stärksten ist (vgl. hierzu die Abbildungen 5.5 und 5.6). Bedingt durch die stark von 90° abweichende Phasenverschiebung ist es an der gefundenen Messposition nicht möglich, Winkelmessungen durchzuführen, die der Genauigkeit in der Produktspezifi-

kation nahe kommt.

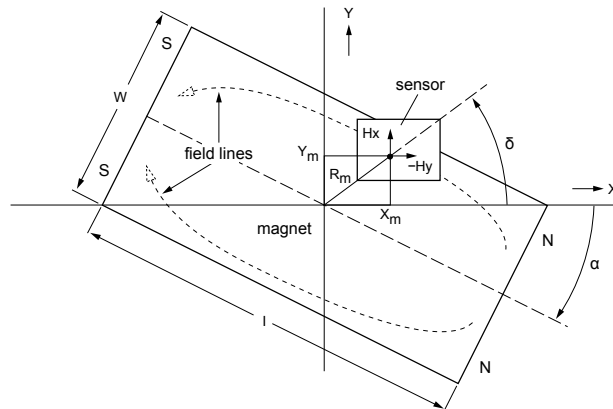


Bild 8.15.: Abweichung der Sensorposition von der Messposition. Dargestellt mit einem Winkelsensor über einem Dauermagneten [11].

Ein weiterer Grund für die Winkelfehler in den Messreihen mit mechanischem Drehen hängt stark mit der Sensorposition im statischen Magnetfeld zusammen. Fällt der Mittelpunkt des von den Spulen erzeugtem Magnetfeldes nicht mit dem geometrischen Mittelpunkt (Drehpunkt) des Kreuzspulenkastens zusammen, ergeben sich auf der so entstehenden Kreisbahn (siehe dazu Bild (8.15)) um den magnetischen Mittelpunkt Schwankungen in der magnetischen Feldstärke. Genauer wurde diese Schwankung in der magnetischen Feldstärke in Kapitel 4.4 erläutert.

Es ist auf Grund des Aufbaus im Kreuzspulenkasten nicht möglich, Winkelmessungen durchzuführen bei denen ein bestimmter Winkel vorgegeben wird und diesen Winkel innerhalb der Spezifikationsgrenzen des KMZ60 zu erfassen. Die Messungen beim elektrischen Drehen zeigen allerdings, dass es möglich ist, nah an die Produktspezifikation zu kommen, wenn um den gefundenen magnetischen Mittelpunkt auch gedreht wird.

	Device 1	Device 2	Wertung
Winkelfehler	0,1515°	-0,0397°	max. aufgetretener Winkelfehler aus allen Messreihen
Offset	$-48,86 \cdot 10^{-15}$	$-56,5 \cdot 10^{-15}$	errechnete Abweichung des Offsets
k-Faktor	0,995	0,997	höchste erfasste Abweichung
Phasenverschiebung	91,19°	90,99°	RMS d. Phasenver. hier: stärkste Abweichung
Winkelfehler	0,49° . . . 4,67° (-1,94% . . . -6,56%)	0,47° . . . 4,73° (-5,2% . . . -5,3%)	bezogen auf den erfassten Winkel
Offset	$-75,12 \cdot 10^{-8}$	$-80,14 \cdot 10^{-8}$	errechnete Abweichung des Offsets
k-Faktor	0,9937	0,9973	höchste erfasste Abweichung
Phasenverschiebung	85,28°	85,54°	RMS d. Phasenver. hier: stärkste Abweichung

Tabelle 8.15.: Zusammenfassung der Messauswertung. Oben: elektrisches Drehen, unten: mechanisches Drehen

9. Zusammenfassung

In diesem letzten Kapitel wird eine Zusammenfassung der Diplomarbeit gegeben. Es werden Lösungen dargestellt und die gefundenen Ergebnisse nochmals zusammen gefasst. Außerdem werden offene Fragen in Bezug auf den Messplatz und die Ergebnisse angesprochen und mögliche Ansätze für deren Lösung präsentiert. Als letzter Punkt wird dann ein abschließendes Fazit gegeben.

9.1. Lösungen und Ergebnisse

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit beinhaltet, dass ein Messplatz entwickelt wird, welcher mittels Harmonischen Analyse in der Lage ist, Winkelsensoren zu testen. Diese Winkelsensoren basieren auf dem AMR-Effekt und sind durch zwei Wheatstone-Messbrücken realisiert, welche um 45° zueinander verbaut wurden. Durch diese Maßnahme erhält man als Ausgangssignal der Messbrücken zwei Spannungen. Die Ausgangsspannungen des Winkelsensors sind um 90° Phasenverschoben und haben eine Sinusform. Mittels der Harmonischenanalyse, der Brückenausgangssignale V_{out1} und V_{out2} , soll festgestellt werden, ob die Messposition des Winkelsensors im magnetischen Feld gute oder schlechte Bedingungen für Winkelmessungen bietet. Aus dieser Aufgabenstellung, lassen sich folgende weiteren Teilaufgaben für die Entwicklung eines solchen Messplatzes ableiten:

- Suche einer optimalen Messposition im magnetischen Feld durch Entwicklung eines geeigneten Vorjustage-Verfahrens
- Entwicklung einer motorisierten Verfahrensmethode für die X- und Y-Achse
- Entwicklung einer motorisierten Verfahrensmethode zur Winkeländerung zwischen Magnetfeld und Winkelsensor
- automatisierte Erfassung und Auswertung der relevanten Messgrößen (Klirrfaktor, k-Faktor, Offset, Phasenverschiebung)
- Auswertung und Beurteilung der Messreihen.

Als geeignetes Mittel zur Vorjustage des Winkelsensors im Magnetfeld des Kreuzspulenkastens haben sich zwei Verfahren als praktikabel erwiesen. Zur Vorjustage im elektrisch rotierenden Feld eignet sich die Klirrfaktor-Positionsbestimmung. Hierbei wird eine festgelegte Fläche innerhalb des Kreuzspulenkastens vermessen, indem an den gewählten Messpositionen die Brückenausgangssignale des Winkelsensors aufgezeichnet werden. Diese werden anschließend hinsichtlich des Klirrfaktors untersucht. Der Bereich innerhalb des Kreuzspulenkastens, in dem der Klirrfaktor niedrig ist (ca. -45 dB), eignet sich für Messungen mit dem Winkelsensor.

Als zweite Möglichkeit der Vorjustage erwies sich die Methode der Offset-Spannungsmessung der Brückenausgangssignale. Diese Methode eignet sich für die Positionsbestimmung im statischen Feld. Hierbei durchfährt man wieder eine festgelegte Fläche (Messraster) im Kreuzspulenkasten. Dabei sind die Spulen einer Achse so gepolt, dass die erzeugten Magnetfelder gegeneinander wirken. Mit dieser Methode kann, mit Hilfe des Winkelsensors, der feldfreie Raum zwischen den Spulen erfasst werden. An dieser Stelle befindet sich die optimale Messposition des Winkelsensors für Messungen mit statischem Feld.

Um das festgelegte Messraster durchfahren zu können, und an jedem Messpunkt Messungen aufzuzeichnen, wurde eine Motorisierung der X- und Y-Achse verbaut. Diese Motoren werden mittels eines Matlab Steuerprogramm bedient. Eine Ansteuerung des Drehmesstisches zur Winkelveränderung erfolgt ebenfalls unter Matlab. Die Ansteuerung der jeweiligen Motoren erfolgt aus einem Hauptprogramm, welches außerdem die Signalauswertung und die Ansteuerung der Messinstrumente beinhaltet. Als Startbedingung einer Messung müssen folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Ansteuern der Startposition des Messrasters (siehe hierzu Bild 5.4)
- Vorgabe der Größe (Verfahrweg der X-Achse, bzw. Y-Achse) des Messrasters
- Abstand der einzelnen Messpunkte

Auf eine Motorisierung der Z-Achse (der Höhenachse) wurde verzichtet, da die Messhöhe einmalig nach jedem Sensorwechsel eingestellt und danach konstant gehalten wird. Auf der F-Achse wurde die Sensorhalterung und eine Möglichkeit zur Verkippung des Winkelsensors angebracht. Die Verkippungseinrichtung wurde benötigt, da bei den ersten Messungen festgestellt wurde, dass der Sensor in seiner Sensorhalterung eine Verkippung (relativ zum Magnetfeld im Kreuzspulenkasten) von $0,2^\circ$ zur X-Achse aufwies.

Bei der Auswertung der Messreihen zeigte sich, dass das Verfahren der Positionsbestimmung mittels elektrischen Drehen die besseren Ergebnisse lieferte. Im Vergleich zum

mechanischen Drehen traten dort deutlich niedrigere Winkelfehler auf. Die anderen Messgrößen k-Faktor und Offset sind bei beiden Verfahren von gleicher Qualität. Diese Faktoren stehen einer Winkelmessung mit geringem Fehler nicht im Wege. Anders verhält es sich mit der Phasenverschiebung. Hier traten deutliche Schwankungen um die geforderte Größe 90° auf. Die Schwankungen des elektrischen Drehens lagen dabei deutlich näher an den 90° als die Schwankungen in der Phasenverschiebung beim mechanischen Drehen. Hier gab es Abweichungen von mehreren Winkelgraden. Dies läßt die Schlußfolgerung zu, dass die gefundene Messposition beider Verfahren eine unterschiedliche Qualität aufweist.

Da die Messpositionsbestimmung für beide Verfahren gute Ergebnisse liefert, kann der Unterschied in der Qualität darin begründet sein, dass die Positionstreue beim elektrischen Drehen unverändert bleibt. Dort dreht sich das erzeugte Magnetfeld um den Winkelsensor. Beim mechanischen Drehen besteht die Möglichkeit des Positionsverlustes, da hier der gesamte Kreuzspulenkasten um den Winkelsensor gedreht wird. Sollte daher der mechanische Drehpunkt nicht mit der gefundenen Messposition zusammen fallen, ergibt sich eine Kreisbahn, auf welcher sich der Winkelsensor durch das magnetische Feld des Kreuzspulenkastens bewegt. Auf dieser Kreisbahn kommt es zu Schwankungen in der Feldstärke und zu Schwankungen im Gradienten der Feldlinien. Diese Schwankungen können mitunter so groß sein, dass der Winkelsensor die Bedingungen der gefundenen Messposition nicht mehr vorfindet. Möglich sind Veränderungen der Umgebung in Bezug auf Feldstärke und den Gradienten der Feldlinien, die so ausgeprägt sind, dass eine Mindestforderung der magnetischen Feldstärke unterschritten wird. Eine solche Umgebung hat direkten Einfluss auf die Signalform der Brückenausgangssignale. In Tabelle (9.1) wird gezeigt, welche externen Einflüsse Auswirkung auf das magnetische Feld des Kreuzspulenkastens und auf das Sensorsignal haben.

	geringer Strom	hoher Strom	großer Gradient des magn. Feldes	kleiner Gradient des magn. Feldes	Einbautiefe des Sensors auf der Z-Achse	Verkippung des Sensors
Auswirkung auf den Messpunkt	⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕ ⊕	⊕ ⊕ ⊕ ⊕	⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕	⊖
Auswirkung auf das magn. Feld	⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕ ⊕	0	0	0	0
Auswirkung auf das Sensorsignal	⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕ ⊕ ⊕ ⊕	⊕ ⊕ ⊕ ⊕	⊖ ⊖ ⊖ ⊖	⊕	⊖ ⊖
Auswirkung auf die Kreuzspulen	0	⊖ ⊖ ⊖ ⊖	0	0	0	0
Anmerkungen zur Tabelle	führt zu schwach ausgeprägtem Feld	führt zu hoher thermischer Belastung	starke "Inhomogenität" im mag. Feld	gute "Homogenität" im mag. Feld	Tiefeneinstellung im Kreuzfeld	bezogen auf die X-Achse Kreuzfeld

Tabelle 9.1.: Tabelle der Faktoren, welche die Winkelmessung beeinflussen (⊕ positiv, 0 neutral, ⊖ negativ)

9.2. Offene Fragestellungen

Der entstandene Messplatz bietet noch Platz für Verbesserungen. Die hier vorgeschlagenen Verbesserungen dienen in erster Linie dazu, eine bessere magnetische Umgebung für den Winkelsensor zu schaffen. Mögliche Verbesserungsvorschläge werden im Folgenden gemacht.

Entwicklung eines neuen Kreuzspulenkastens

Eine mögliche Verbesserung betrifft das Kreuzspulenfeld. Hier konnte man bei den Messungen mit mechanischen Drehen feststellen, dass die Feldstärke zu niedrig und der Raum in dem die Feldlinien einen geringen Gradienten besitzen zu klein ist. Daher sollten erste Verbesserungen am Messplatz dem Kreuzspulenkasten gelten. Nachzudenken wäre über größere und stärkere Spulen. Mit größer ist hier eine Zunahme im Spulendurchmesser gemeint. Damit verbunden ist die Annahme einen größeren Raum in der Mitte des Kreuzspulenkastens zu erzeugen, in welchem der Gradient der Feldlinien klein ist. Stärkere Spulen sind aus dem Grunde wünschenswert, da in der Mitte des Kreuzspulenfeldes ein Absinken der magnetischen Feldstärke zu beobachten ist. Daher kann es passieren, dass die magnetische Feldstärke unter die geforderten $25 \frac{kA}{m}$ fällt. Mit Spulen, welche eine größere Feldstärke erzeugen, könnte dieses Abfallen verhindert werden. Größere Spulen erzeugen leider auch mehr Wärme. Daher ist es notwendig mit einer Verbesserung des Kreuzspulenkastens auch die Wärmeabfuhr, sprich die Kühlung der Spulen zu verbessern. Kühlkörper könnten hier Verwendung finden, in Verbindung mit größeren Lüftern.

Sensorhalterung erweitern

Eine mögliche, aber nicht zwingend notwendige Verbesserung betrifft die Sensorhalterung. Zurzeit können ausschließlich Sensoren mit SOT 8 Sockel genutzt werden. Hier wäre eine Erweiterung zur Aufnahme anderer Sensortypen wünschenswert. Mögliche Ideen könnte hierzu das Labor für digitale Fertigung im M+P Bereich der HAW Hamburg liefern.

Neues Endschalersystem

Um den Startpunkt der Messungen verlässlich wieder zu finden, wurden Endschalter platziert. Die Positionen dieser Endschalter verhindern allerdings den Einsatz während des mechanischen Drehvorgangs. Daher wäre eine gute Verbesserung zur Erhöhung der Wiederholbarkeit und Messgenauigkeit die Überarbeitung des vorhandenen Systems. Die neuen Positionen der Endschalter darf sich beim mechanischen Drehvorgang nicht störend auswirken. Eine mögliche Einbauposition wäre die Montage der Endschalter auf den jeweiligen Schlitten der Achsen des Koordinatentisches.

Erweiterung der Positionierungsmöglichkeiten

Durch den Einbau eines weiteren Koordinatentisches würde die Möglichkeit geschaffen werden, eine Differenz zwischen Drehachse und Messposition auszugleichen. Durch das Abstimmen der beiden Achsen auf die Drehachse des Kreuzspulenkastens könnten störende Einflüsse durch Schwankungen im Gradienten des magnetischen Feldes und der Feldstärke reduziert werden. Dieses wäre ein Ansatz, um die Winkelmessungen im statischen magnetischen Feld zu verbessern. Vielleicht gelingt es so, die Ergebnisse des mechanischen Drehens an das elektrische Drehen anzugleichen. Der zusätzliche Koordinatentisch müsste auf dem Drehmesstisch DMT65 befestigt werden. In der Phase der Messpositionsfindung würde der Kreuzspulenkasten noch mittig über der Drehachse des DMT65 positioniert sein. Sollte die gefundene Messposition von der Drehachse abweichen, könnte die Messposition mittels des Koordinatentisches deckungsgleich mit der Drehachse gebracht werden.

Winkelvorgabe während des elektrischen Drehens

Eine weitere interessante Verbesserung wäre eine Winkelmessung durch Vorgabe eines Winkels bei der Methode des elektrischen Drehens. Hierzu müsste ein Matlab Skript entwickelt werden, welches den Funktionsgenerator ansteuert. Der Funktionsgenerator würde in diesem Fall als einstellbare Spannungsquelle arbeiten. So könnten über ein entsprechendes Matlab-Skript nacheinander definierte Spannungswerte der Kosinus- und Sinusanregung der Spulen ausgegeben werden. Nach jeder Änderung der Spannung müsste eine Winkelmessung erfolgen. Auf diesem Wege wäre es möglich, vorher festgelegte Winkeländerungen zu messen.

Alle hier vorgetragenen Verbesserungsvorschläge dienen dazu, die Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit zu erhöhen. Größtes Augenmerk sollte hierbei auf eine Verbesserung des Kreuzspulenkastens gelegt werden. Nur so wird man in der Lage sein, über die Spezifikationsgrenzen der Winkelsensoren zu gelangen. Reine Messungen, bezüglich der Funktion des Winkelsensors, sind bereits jetzt möglich.

9.3. Fazit

Mit dieser Diplomarbeit wurde gezeigt, dass es möglich ist mit dem gebauten Messplatz Winkelmessungen mit verschiedenen Winkelsensoren durchzuführen. Es wurde eine automatisierte Umgebung geschaffen, mit der nach jedem Sensorwechsel eine Messposition im Kreuzspulenkasten gefunden und angefahren werden kann. Mit dieser Diplomarbeit wurde gezeigt, dass es annähernd möglich ist theoretisch festgelegte Spezifikationen bei magnetischen Winkelsensoren zu untersuchen. Mit diesem Messplatz wurde ein Beitrag zum besseren Verständnis von magnetischen Winkelsensoren geleistet.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Boll and K. J. Overshott. Magnetic sensors. In W. Göpel, J. Hesse, and J. N. Zemel, editors, *Sensors a Comprehensive Survey*, volume 5. VCH, Weinheim, 1989. insb. Kap. 9 von U. Dibbern.
- [2] Hans Christoph Wolf Herman Haken. *Atom- und Quantenphysik: eine Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. Springer Verlag, Berlin, 1987.
- [3] Wikimedia Foundation Inc. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Besselsche_Differentialgleichung, [Stand: 09.Februar.2011].
- [4] Wikimedia Foundation Inc. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_coilt, [Stand: 12.Februar.2011].
- [5] Wikimedia Foundation Inc. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lissajous-Figur>, [Stand: 13.Januar.2011].
- [6] Kristian Kroschel Karl-Dirk Kammeyer. *Digitale Signalverarbeitung - Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen*. B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [7] Marlene Marinescu. *Elektrische und magnetische Felder: eine praxisorientierte Einführung*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [8] NXP. KMA199E - Programmable angle sensor - Objective data sheet Rev.01, 2007.
- [9] NXP. KMZ60 - Angle sensor with integrated amplifier- Objective data sheet V1.03, 2010.
- [10] Owis GmbH. Produktinformation Drehmesstisch DMT65 - Ausg. 14.12.2009, 2009.
- [11] Philips Semiconductors. Semiconductor Sensors Data Handbook SC17, 2001.
- [12] Leyla Ranjgari. FFT-Analyse des Einflusses von Ortsabhängigen magnetischen Feldern auf AMR-Winkelsensoren. Diplomarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg / NXP Semiconductors GmbH Hamburg, September 2009.
- [13] Christian Schoermer. AMR-Messbrücken für ABS-Sensoren. Studienarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg / NXP Semiconductors, März 2008.
- [14] Philips Semiconductors. Contactless Angle Measurement Using KMZ41 and UZZ9000 - Application Note AN00023, 2000.

-
- [15] Philips Semiconductors. Contactless Angle Measurement Using KMZ41 and UZZ9001 - Application Note AN00004, 2000.
- [16] Frank Siebenmorgen. Ansterelektronik und Mikrocontrollersteuerung eines Kreuzspulenmessplatzes für ABS-Sensoren. Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Juni 2009.
- [17] Trinamic Motion Control GmbH und Co KG. TMC428 Data Sheet Version 2.02, 2006.
- [18] Trinamic Motion Control GmbH und Co KG. QMot QSH4218 family - Manual Version 1.05, 2009.
- [19] Trinamic Motion Control GmbH und Co KG. TMCM351 TMCL Firmware Manual Version 1.02, 2009.
- [20] Waldemar v. Münch. *Elektrische und magnetische Eigenschaften der Materie*. B.G.Teubner, Stuttgart, 1987.

A. Anhang

A.1. Bilder

A.1.1. Bilder zu Kapitel 4

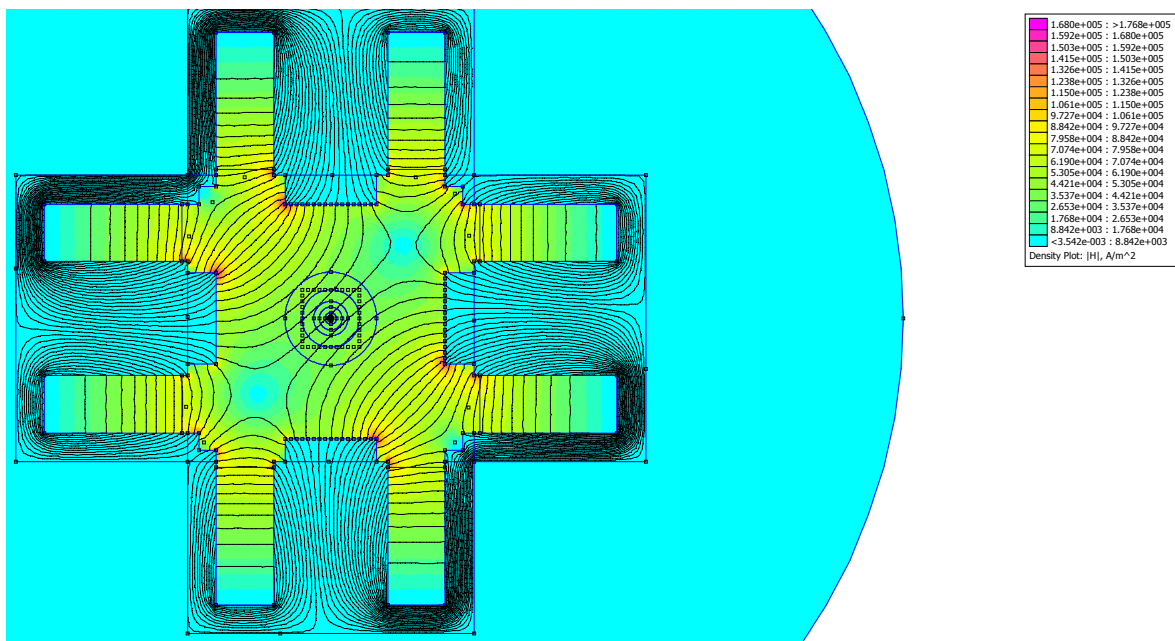


Bild A.1.: Dargestellt ist die Verteilung des magnetischen Feldes im simulierten Kreuzfeldkasten. Farblich codiert ist die magnetische Feldstärke dargestellt.

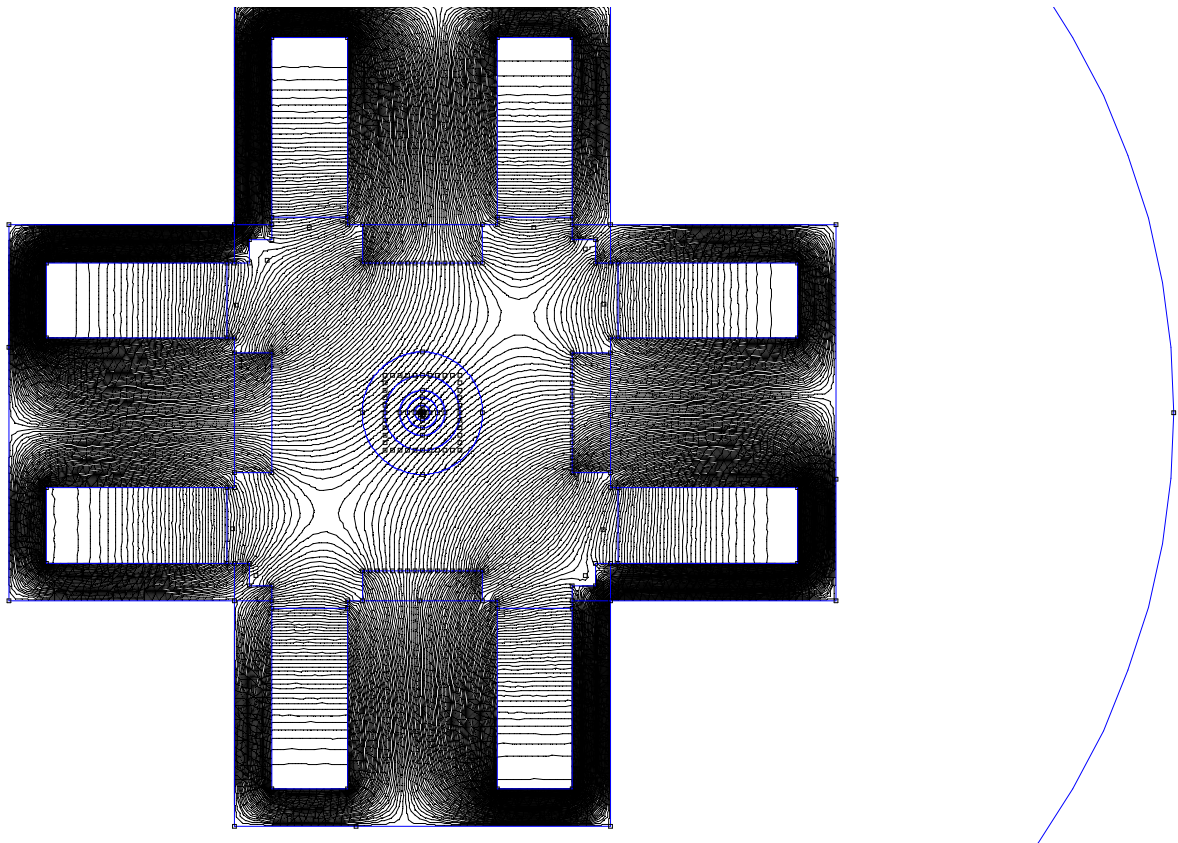


Bild A.2.: Hier ist die Feldlinienverteilung im Kreuzfeldkasten simuliert. Die Spulen einer Achse sind parallel geschaltet, wie es auch bei Messungen mit dem Winkelsensor erfolgte.

A.1.2. Bilder zu Kapitel 5

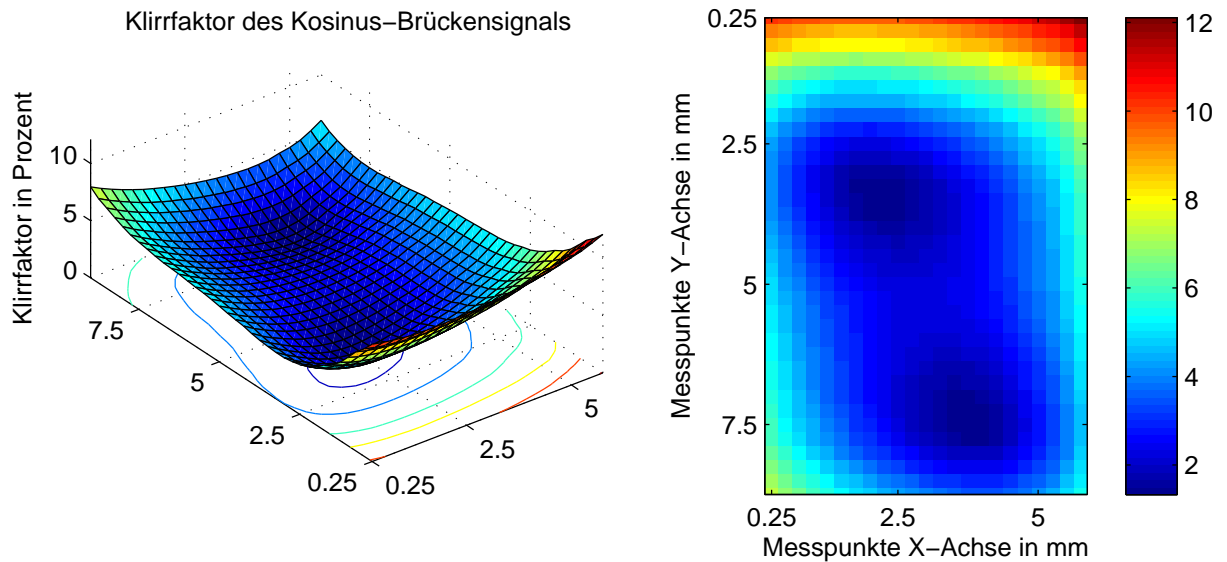


Bild A.3.: Messergebnis einer Messreihe zur Positionsbestimmung mit zwei Minima. Farblich kodiert wurde der Klirrfaktor in Prozent. Ein solches Messergebnis resultiert aus einer Verkippung des Sensors. Zu sehen ist in dem Bild die Klirrfaktoren der Kosinus-Messbrücke. Deutlich ist in der Mitte des Messbereiches ein Doppeltrichter zu erkennen.

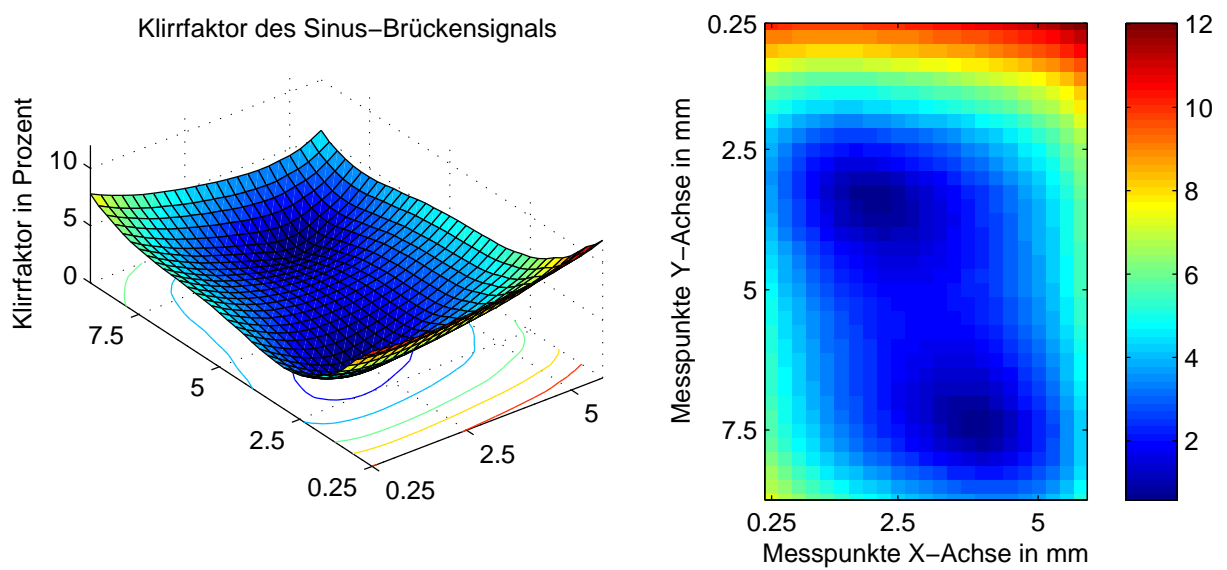


Bild A.4.: Messergebnis einer Messreihe zur Positionsbestimmung mit zwei Minima. Farblich kodiert wurde der Klirrfaktor in Prozent. Ein solches Messergebnis resultiert aus einer Verkippung des Sensors. Zu sehen ist in dem Bild die Klirrfaktoren der Sinus-Messbrücke.

A.1.3. Bilder zu Kapitel 7

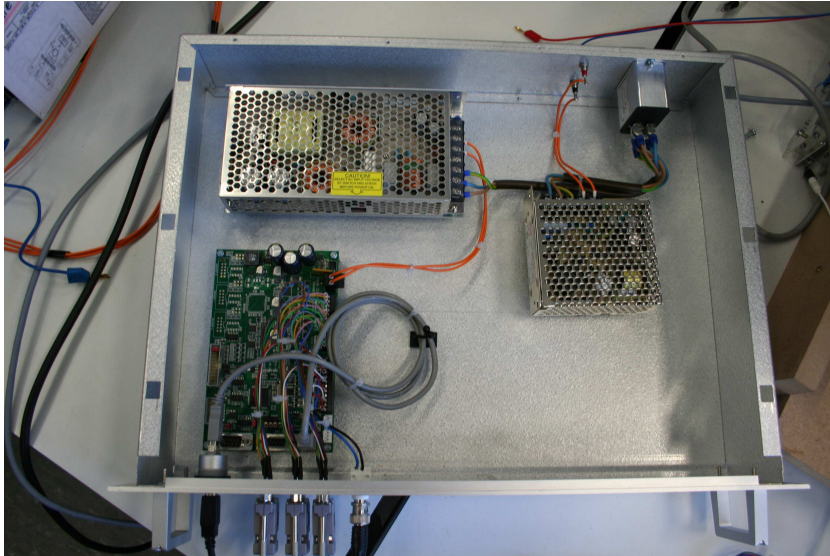


Bild A.5.: Innenansicht des 19 Zoll Gehäuses. Zu sehen ist die Steuerplatine TMCM-351, eine 24 V Spannungsversorgung (links oben) für die Steuerungsplatine und eine 12 V Spannungsversorgung (oben rechts) für die Kühlung der Kreuzspulenkästen.

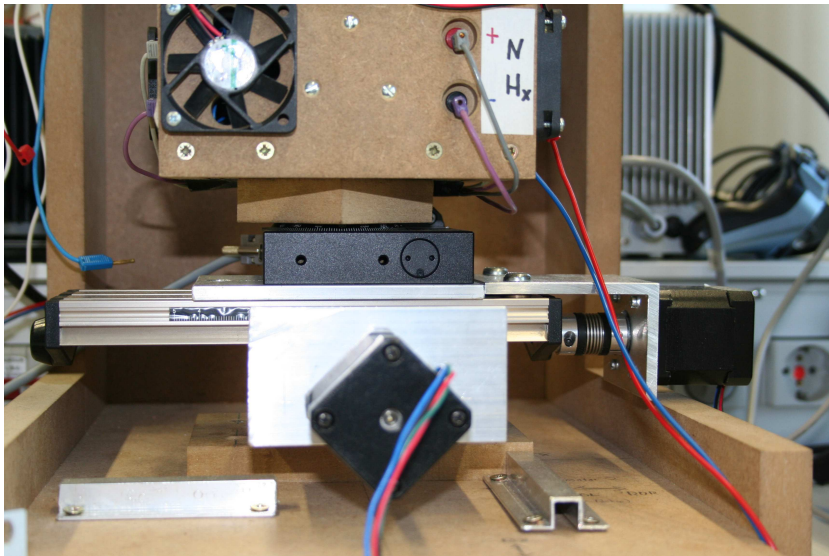


Bild A.6.: Auf diesem Bild sind die Motoren QSH4218 des Koordinatentisches zum Verfahren in X- und Y- Richtung.

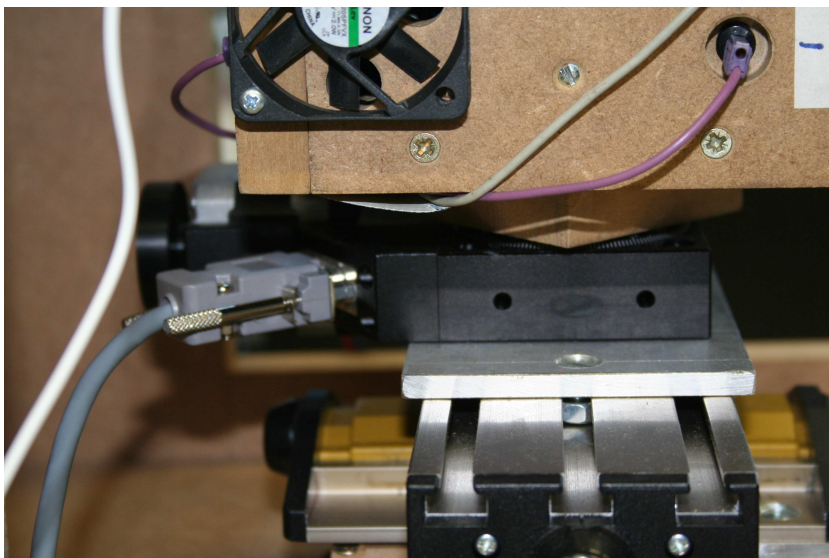


Bild A.7.: Hier ist die Position des Drehmesstisches DMT65 zu erkennen. Platziert ist dieser auf dem Koordinatentisch. Darüber ist ein Kreuzspulenkasten erkennbar.

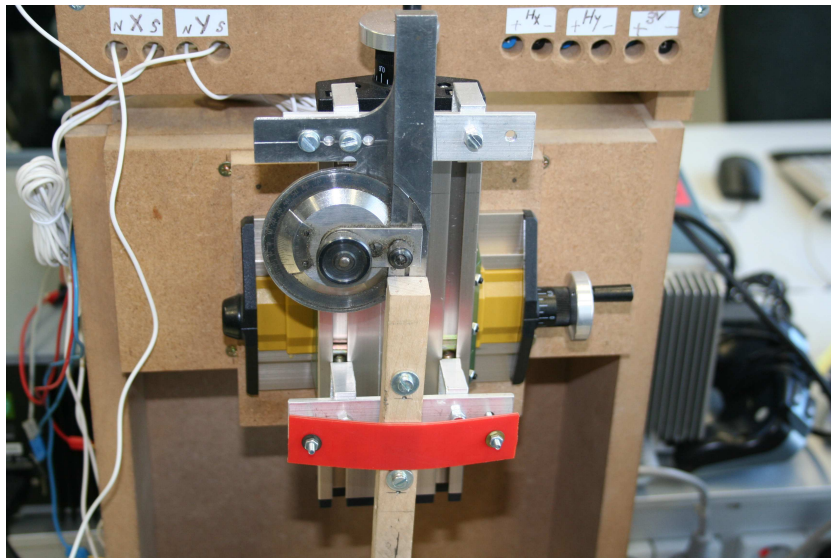


Bild A.8.: Zu sehen ist auf diesem Bild die Verkippungseinrichtung der Z-Achse. An dieser Verkippungseinrichtung ist direkt der Sensorstab mit dem Winkelsensor KMZ60 angebracht.

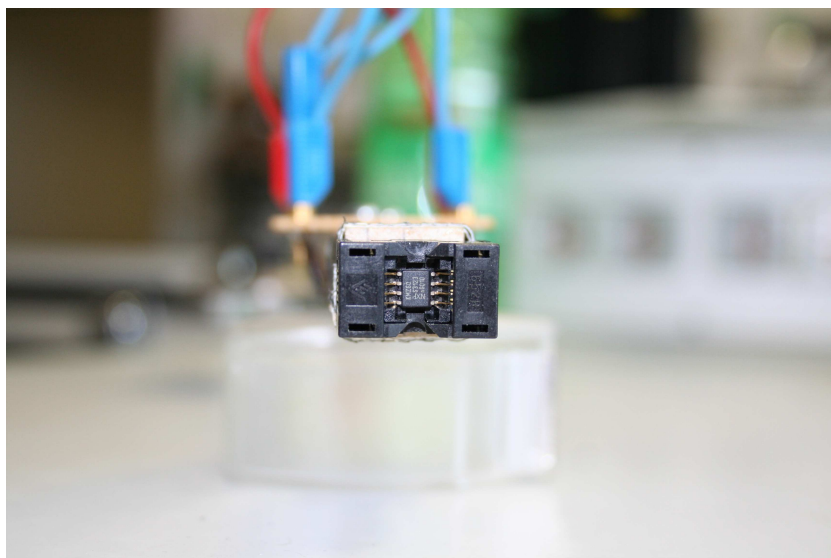


Bild A.9.: In diesem Bild ist der ZIF-Socket mit eingesetzten KMZ60 zu sehen. Der ZIF-Socket ist an der Spitze des Sensorstabs angebracht.

A.2. Software

M-File zum Hauptprogramm einer Messreihe

```

%
%           Messprogramm
%           Beinhaltet die Ansteuerung und Positionierung der x- und
%           y-Achse, Ansteuerung des Oszilloskops und die Speicherung
%           der wichtigsten Messwerte in eine separate Datei.
%
%


---


% Festlegung des Messbereiches im Kreuzfeldkasten

c=1;           %Index für Speichermatrix Spalten
b=1;           %Index für Speichermatrix Zeilen

s_weite=0.5;   %Schrittweite eingeben in mm
x_coord=[0:s_weite:10]; %Messpunkte auf X-Achse Spulenkasten in mm
y_coord=[0:s_weite:10]; %Messpunkt auf Y-Achse Spulenkasten in mm

x_laenge=length(x_coord);
y_laenge=length(y_coord);

%Anzahl der Steps für einen Fahrweg von 1 mm ausrechnen
%Berechnung erfolgt aufgrund der Ausgewählten Microstep Resolution
%weg=(1/0.00126);

% THD-Daten des COS-Brückensignals
COS_thd=zeros(y_laenge , x_laenge );

% THD_Daten des SIN-Brückensignals
SIN_thd=zeros(y_laenge , x_laenge );

%Speichermatrizen deklarieren
k_faktor_matrix=zeros(y_laenge , x_laenge );
phase_matrix=zeros(y_laenge , x_laenge );
Vout1_offset_matrix=zeros(y_laenge , x_laenge );
Vout2_offset_matrix=zeros(y_laenge , x_laenge );
Vout1_3harm_matrix=zeros(y_laenge , x_laenge );

```

```

Vout2_3harm_matrix=zeros(y_laenge,x_laenge);
Vout1_5harm_matrix=zeros(y_laenge,x_laenge);
Vout2_5harm_matrix=zeros(y_laenge,x_laenge);

%% Beginn der Messungen
%Variablendeklaration
grad = 12800;
%Umrechnung für 1 mm Wegstrecke
weg= 12800;

%% Verbindungsaufbau mit Motorsteuerung für Ansteuerung der Achsen

[deviceObj, interfaceObj] = Ansteuerung_XAchse();
[deviceObj, interfaceObj] = Ansteuerung_YAchse();

%-----
% Messposition anfahren
% Fahrweg auf X – und Y – Achse
while b ~= (y_laenge+1);

    %if c <= (x_laenge+1);

        while c <= (x_laenge-1);
            %Messung starten
            [Vout1, Vout2, u_sin, u_cos, rec_time, rec_length] ...
                =Ansteuerung_Scope();

            %Signalverlauf von Vout1 und Vout2 speichern
            save([ 'Signalverlauf_' num2str(b) num2str(c) '.mat' ],...
                'Vout1', 'Vout2', 'u_sin', 'u_cos', 'rec_time', ...
                'rec_length');

            %Messsignal auswerten
            [Vout1_offset_matrix, Vout2_offset_matrix, phase_matrix,...
                k_faktor_matrix, COS_thd, SIN_thd, Vout1_3harm_matrix, ...
                Vout2_3harm_matrix, Vout1_5harm_matrix, Vout2_5harm_matrix]...
            = Signalauswertung2(Vout1, Vout2, y_laenge, x_laenge,...
                rec_time, rec_length, c, b, COS_thd, SIN_thd, ...
                k_faktor_matrix, phase_matrix, Vout1_offset_matrix, ...
                Vout2_offset_matrix, Vout1_3harm_matrix, ...

```



```

        Vout2_3harm_matrix, Vout1_5harm_matrix, ...
        Vout2_5harm_matrix);

    %0.5 mm verfahren
    set(deviceObj, 'motor', 2);
    invoke(deviceObj, 'mvp', 'relative', (-s_weite*weg));
    pause(7);

    c=c+1;
    end;
%end;
if mod(c, x_laenge)==0;
    %Messung starten
    [Vout1, Vout2, u_sin, u_cos, rec_time, rec_length] ...
    =Ansteuerung_Scope();
    %Signalverlauf von Vout1 und Vout2 speichern
    save(['Signalverlauf_' num2str(b) num2str(c) '.mat'], ...
        'Vout1', 'Vout2', 'u_sin', 'u_cos', 'rec_time', ...
        'rec_length');

    %Messsignal auswerten
    [Vout1_offset_matrix, Vout2_offset_matrix, phase_matrix, ...
    k_faktor_matrix, COS_thd, SIN_thd, Vout1_3harm_matrix, ...
    Vout2_3harm_matrix, Vout1_5harm_matrix, Vout2_5harm_matrix]...
    = Signalauswertung2(Vout1, Vout2, y_laenge, x_laenge, ...
    rec_time, rec_length, c, b, COS_thd, SIN_thd, ...
    k_faktor_matrix, phase_matrix, Vout1_offset_matrix, ...
    Vout2_offset_matrix, Vout1_3harm_matrix, ...
    Vout2_3harm_matrix, Vout1_5harm_matrix, ...
    Vout2_5harm_matrix);

    %X-Achse auf Startposition zurück fahren
    set(deviceObj, 'motor', 2);
    invoke(deviceObj, 'mvp', 'relative', (s_weite*(x_laenge-1)*weg));
    pause(70);

    %Y-Achse anwählen
    set(deviceObj, 'motor', 1);
    %Y-Achse um 0.5 mm verfahren

```

```
invoke(deviceObj, 'mvp', 'relative', (-s_weite*weg));
pause(5);
b=b+1;
c=1;

%Messergebnisse abspeichern
save('Messergebnis.mat', 'Vout1_offset_matrix', ...
      'Vout2_offset_matrix', 'phase_matrix', 'k_faktor_matrix', ...
      'COS_thd', 'SIN_thd', 'b', 'c', 'Vout1_3harm_matrix', ...
      'Vout2_3harm_matrix', 'Vout1_5harm_matrix', ...
      'Vout2_5harm_matrix', 'x_coord', 'y_coord', 's_weite');
end;

if b == (y_laenge+1);
    c=100;
end;
end;
```

M-File zum Auswerten der Signalverläufe

```

%
%      M-File zur Bestimmung des Offsets der Brückenausgangssignale ,
%      der Phasenverschiebung zwischen den Brückenausgangssignalen
%      und zur Amplitudenberechnung mit anschließender Bestimmung
%      des k-Faktors
%
%      Wichtig sind die Übergabe der Operanden für die
%      Speichermatrizen und die manuelle Eingabe der zu erwartenden
%      Frequenz des angeregten Kreuzfeldes!
%
%
%      Version Signalauswertung2
%      Hierwurde im Vergleich zur Version Signalauswertung die
%      Phasenverschiebung erneuert. Der Wert der Phasenverschiebung
%      wird nun immer im Bereich um +/-90° angezeigt.
%      Außerdem wird nun die Klirrfaktorberechnung mittels der
%      Funktion harmonics() durchgeführt.
%
%


---


function [Vout1_offset_matrix , Vout2_offset_matrix , phase_matrix ,...
    k_faktor_matrix , COS_thd, SIN_thd , Vout1_3harm_matrix , ...
    Vout2_3harm_matrix , Vout1_5harm_matrix , Vout2_5harm_matrix]...
= Signalauswertung2(Vout1 , Vout2 , y_laenge , x_laenge ,...
    rec_time , rec_length , c , b , COS_thd , SIN_thd , ...
    k_faktor_matrix , phase_matrix , Vout1_offset_matrix , ...
    Vout2_offset_matrix , Vout1_3harm_matrix , ...
    Vout2_3harm_matrix , Vout1_5harm_matrix , ...
    Vout2_5harm_matrix);

%% Variablendeklaration

tol=0.05; %Suchtoleranz für DFT
fvout=4; %Frequenz von Vout(geschätzt)
fsample=25000; %Abtastfrequenz Oszilloskop
f_ersatz=fvout;
s_fak=300; %Hysterese um Suchposition
rec_length=1000000; %Aufnahmepunkte des Oszi
rec_time=10; %Aufnahmezeit in Sekunden
weite=((rec_length/rec_time)/fvout); %ideale Periodenlänge

```

```

a=[0:weite:rec_length];                                     %theoretische Periodenlänge

%% Bestimmung des Offsets
Vout1_max=max(Vout1);                                     %Maximum des COS-Brückensignals
Vout2_max=max(Vout2);                                     %Maximum des SIN-Brückensignals

Vout1_min=min(Vout1);                                     %Minimum des COS-Brückensignals
Vout2_min=min(Vout2);                                     %Minimum des SIN-Brückensignals

Vout1_offset=Vout1_min;
Vout2_offset=Vout2_min;

fprintf(1, 'Der_Offset_des_COS-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_V_\n', ...
        Vout1_offset)
fprintf(1, '\n');
fprintf(1, 'Der_Offset_des_SIN-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_V_\n', ...
        Vout2_offset)
fprintf(1, '\n');

%% Auswertung des COS-Brückensignals
%Hier werden die ersten 4 Minima und Maxima ermittelt.
%Wichtig ist, das als erstes das erste Maximum des COS-Brückensignals
%gesucht wird. Diese Position bildet den ersten Grenzwert des
%Suchintervalles.

%Zeitpunkte der ersten 4 Maxima

%erstes Maxima im angegebenen Intervall
%Gesucht wird im Bereich 1. Vektoreintrag bis zum theoretischen Zeitpunkt
%einer beginnenden 2. Periode. Der Zeitraum ist so lang gewählt worden da
%nicht voraus gesagt werden kann zu welchem Zeitpunkt eine Messung startet.
%Die gefundene Maximalposition wird mit der Zeitbasis multipliziert um den
%Zeitpunkt zu bestimmen.
max1=max(Vout1(1:(a(2)+2*s_fak)));
max1_pos=find(max1 == Vout1(1:(a(2)+2*s_fak)),1);
max1_zeit=max1_pos*(rec_time/rec_length);

%zweites Maxima im angegebenen Intervall
%Der Suchbereich wird verschoben, und zwar beginnend von der Position des

```

%ersten Maxima bis zur theoretischen Position des 2. Maxima plus einem %Hysteresefaktor.

```
max2=max(Vout1((max1_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+max1_pos+s_fak)));
max2_pos=find(max2 == Vout1((max1_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+max1_pos+s_fak)),1);
max2_pos=max2_pos+(max1_pos+a(2)-s_fak);
max2_zeit=max2_pos*(rec_time/rec_length);
```

%drittes Maxima im angegebenen Intervall

```
max3=max(Vout1((max2_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+max2_pos+s_fak)));
max3_pos=find(max3 == Vout1((max2_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+max2_pos+s_fak)),1);
max3_pos=max3_pos+(max2_pos+a(2)-s_fak);
max3_zeit=max3_pos*(rec_time/rec_length);
```

%viertes Maxima im angegebenen Intervall

```
max4=max(Vout1((max3_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+max3_pos+s_fak)));
max4_pos=find(max4 == Vout1((max3_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+max3_pos+s_fak)),1);
max4_pos=max4_pos+(max3_pos+a(2)-s_fak);
max4_zeit=max4_pos*(rec_time/rec_length);
```

%% Zeitpunkte der ersten 4 Minima

%erstes Minima im angegebenen Intervall

%Die Minima werden auf die gleiche Art wie die Maxima gesucht. Unterschied %ist hier die Startposition der Suche im Ausgangssignalvektor. Begonnen %wird hier mit der Position des ersten gefundenen Maximas bis zur %theoretischen halben Periodenlänge plus einer Hysterese.

```
min1=min(Vout1(max1_pos:(max1_pos+weite/2+s_fak)));
min1_pos=find(min1 == Vout1(max1_pos:(max1_pos+weite/2+s_fak)),1);
min1_pos=min1_pos+max1_pos;
min1_zeit=min1_pos*(rec_time/rec_length);
```

%zweites Minima im angegebenen Intervall

```
min2=min(Vout1((min1_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+min1_pos+s_fak)));
min2_pos=find(min2 == Vout1((min1_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+min1_pos+s_fak)),1);
min2_pos=min2_pos+(min1_pos+a(2)-s_fak);
```

```

min2_zeit=min2_pos*(rec_time/rec_length);

%drittes Minima im angegebenen Intervall
min3=min(Vout1((min2_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+min2_pos+s_fak)));
min3_pos=find(min3 == Vout1((min2_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+min2_pos+s_fak)),1);
min3_pos=min3_pos+(min2_pos+a(2)-s_fak);
min3_zeit=min3_pos*(rec_time/rec_length);

%viertes Minima im angegebenen Intervall
min4=min(Vout1((min3_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+min3_pos+s_fak)));
min4_pos=find(min4 == Vout1((min3_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+min3_pos+s_fak)),1);
min4_pos=min4_pos+(min3_pos+a(2)-s_fak);
min4_zeit=min4_pos*(rec_time/rec_length);

%Durchschnittswerte der Maxima und Minima
%Aus den gefundenen Werten der Minima und Maxima wird ein Durchschnitt
%gebildet.
max_durch=(max1+max2+max3+max4)/4;
min_durch=(min4+min3+min2+min1)/4;

%% Nulldurchgang festlegen
%Aus den Durchschnittswerten der Minima und Maxima wird der Nulldurchgang
%festgelegt.
nulld=(max_durch-min_durch)/2+min_durch;

%Nulldurchgang für 2 Perioden finden
%Gesucht wird der Wert des ermittelten Nulldurchgangs im Intervall zwischen
%dem ersten Maxima Und Minima. Sollte dieser Wert nicht vorhanden sein im
%Ausgangssignalvektor wird der nächst gelegene Wert, mit einer Abweichung
%von maximal 0.00001 im angegebenen Intervall gesucht. Das Gleiche passiert
%mit dem zweiten Nulldurchgang im Intervall zwischen zweiten Maxima und
%zweiten Minima.
nulld1_pos=find(nulld == Vout1(max1_pos:min1_pos),1);
nulld1_groesse=size(nulld1_pos);
nulld1_inhalt=sum(nulld1_groesse);
if nulld1_inhalt == 1
    Vout1_nullsuche=Vout1-nulld;
    Vout1_nullsuche_pos1=find(0.00001 >= ...

```

```

        Vout1_nullsuche(max1_pos:min1_pos),1);
end;
if nulld1_inhalt ~= 1
    Vout1_nullsuche_pos1=nulld1_pos;
end;
nulld1_pos=Vout1_nullsuche_pos1+max1_pos;
%Zeitpunkt des ersten Nulldurchgangs
nulld1_zeit=nulld1_pos*(rec_time/rec_length);

nulld2_pos=find(nulld == Vout1(max2_pos:min2_pos),1);
nulld2_groesse=size(nulld2_pos);
nulld2_inhalt=sum(nulld2_groesse);
if nulld2_inhalt == 1
    Vout1_nullsuche=Vout1-nulld;
    Vout1_nullsuche_pos2=find(0.00001 >= ...
        Vout1_nullsuche(max2_pos:min2_pos),1);
end;
if nulld2_inhalt ~= 1
    Vout1_nullsuche_pos2=nulld2_pos;
end;
nulld2_pos=Vout1_nullsuche_pos2+max2_pos;
%Zeitpunkt des zweiten Nulldurchgangs
nulld2_zeit=nulld2_pos*(rec_time/rec_length);

%Berechnung der Periodendauer auf Grundlage der Nulldurchgänge
T_cos_periode=nulld2_zeit-nulld1_zeit;
%Überprüfung ob eine Periodendauer ermittelt werden konnte
T_cos_periode_groesse=size(T_cos_periode);
T_cos_periode_inhalt=sum(T_cos_periode_groesse);
%Wenn Periodendauer gefunden wurde, normal weiter
if T_cos_periode_inhalt ~= 1
    fprintf(1,...
        'Die_Periodendauer_des_COS-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Sekunden_\n',...
        T_cos_periode)
    fprintf(1, '\n');
    f_cos_periode=1/T_cos_periode;
    fprintf(1,...
        'Die_Frequenz_des_COS-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Hz_\n',f_cos_periode)
    fprintf(1, '\n');
end;

```

```

%Wenn periodendauer nicht gefunden wurde Ersatzwert einsetzen.
%Der Ersatzwert entspricht der theoretisch zu erwartenden Periodendauer bei
%optimalem Signalverlauf.
if T_cos_periode_inhalt == 1
    T_cos_periode=1/f_ersatz;
    fprintf(1,...
        'Die_Periodendauer_des_COS-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Sekunden_\n',...
        T_cos_periode)
    fprintf(1, '\n');
    f_cos_periode=1/T_cos_periode;
    fprintf(1,...
        'Die_Frequenz_des_COS-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Hz_\n', f_cos_periode)
    fprintf(1, '\n');
end;

%% Auswertung des SIN-Brückensignals
%Hier werden die ersten 4 Minima und Maxima ermittelt.
%Wichtig ist, das als erstes das erste Maximum des COS-Brückensignals
%gesucht wird. Diese Position bildet den ersten Grenzwert des
%Suchintervalles. Die Vorgehensweise ist die Gleiche wie beim
%COS-Brückensignal.

%Zeitpunkte der ersten 4 Maxima

%erstes Maxima im angegebenen Intervall
max1_sin=max(Vout2(1:(a(2)+2*s_fak)));
max1_sin_pos=find(max1_sin == Vout2(1:(a(2)+2*s_fak)),1);
max1_sin_zeit=max1_sin_pos*(rec_time/rec_length);

%zweites Maxima im angegebenen Intervall
max2_sin=max(Vout2((max1_sin_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+max1_sin_pos+s_fak)));
max2_sin_pos=find(max2_sin == Vout2((max1_sin_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+max1_sin_pos+s_fak)),1);
max2_sin_pos=max2_sin_pos+(max1_sin_pos+a(2)-s_fak);
max2_sin_zeit=max2_sin_pos*(rec_time/rec_length);

%drittes Maxima im angegebenen Intervall
max3_sin=max(Vout2((max2_sin_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+max2_sin_pos+s_fak)));
max3_sin_pos=find(max3_sin == Vout2((max2_sin_pos+a(2)-s_fak):...
    (a(2)+max2_sin_pos+s_fak)),1);

```



```
max3_sin_pos=max3_sin_pos+(max2_sin_pos+a(2)-s_fak);
max3_sin_zeit=max3_sin_pos*(rec_time/rec_length);
```

%viertes Maxima im angegebenen Intervall

```
max4_sin=max(Vout2((max3_sin_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+max3_sin_pos+s_fak)));
max4_sin_pos=find(max4_sin == Vout2((max3_sin_pos+a(2)-s_fak):...
(a(2)+max3_sin_pos+s_fak)),1);
max4_sin_pos=max4_sin_pos+(max3_sin_pos+a(2)-s_fak);
max4_sin_zeit=max4_sin_pos*(rec_time/rec_length);
```

%% Zeitpunkte der ersten 4 Minima

%erstes Minima im angegebenen Intervall

```
min1_sin=min(Vout2(max1_sin_pos:(max1_sin_pos+weite+s_fak)));
min1_sin_pos=find(min1_sin == Vout2(max1_sin_pos:...
(max1_sin_pos+weite+s_fak)),1);
min1_sin_pos=min1_sin_pos+max1_sin_pos;
min1_sin_zeit=min1_sin_pos*(rec_time/rec_length);
```

%zweites Minima im angegebenen Intervall

```
min2_sin=min(Vout2((min1_sin_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+min1_sin_pos+s_fak)));
min2_sin_pos=find(min2_sin == Vout2((min1_sin_pos+a(2)-s_fak):...
(a(2)+min1_sin_pos+s_fak)),1);
min2_sin_pos=min2_sin_pos+(min1_sin_pos+a(2)-s_fak);
min2_sin_zeit=min2_sin_pos*(rec_time/rec_length);
```

%drittes Minima im angegebenen Intervall

```
min3_sin=min(Vout2((min2_sin_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+min2_sin_pos+s_fak)));
min3_sin_pos=find(min3_sin == Vout2((min2_sin_pos+a(2)-s_fak):...
(a(2)+min2_sin_pos+s_fak)),1);
min3_sin_pos=min3_sin_pos+(min2_sin_pos+a(2)-s_fak);
min3_sin_zeit=min3_sin_pos*(rec_time/rec_length);
```

%viertes Minima im angegebenen Intervall

```
min4_sin=min(Vout2((min3_sin_pos+a(2)-s_fak):(a(2)+min3_sin_pos+s_fak)));
min4_sin_pos=find(min4_sin == Vout2((min3_sin_pos+a(2)-s_fak):...
(a(2)+min3_sin_pos+s_fak)),1);
min4_sin_pos=min4_sin_pos+(min3_sin_pos+a(2)-s_fak);
min4_sin_zeit=min4_sin_pos*(rec_time/rec_length);
```

```

%Durchschnittswerte der Maxima und Minima
max_sin_durch=(max1_sin+max2_sin+max3_sin+max4_sin)/4;
min_sin_durch=(min4_sin+min3_sin+min2_sin+min1_sin)/4;

%% Nulldurchgang festlegen
nulld_sin=(max_sin_durch-min_sin_durch)/2+min_sin_durch;

%Nulldurchgang für 2 Perioden finden
nulld1_sin_pos=find(nulld_sin == Vout2(max1_sin_pos:min1_sin_pos),1);
nulld1_sin_groesse=size(nulld1_sin_pos);
nulld1_sin_inhalt=sum(nulld1_sin_groesse);
if nulld1_sin_inhalt == 1
    Vout2_nullsuche=Vout2-nulld_sin;
    Vout2_nullsuche_pos1=find(0.00001 >=...
        Vout2_nullsuche(max1_sin_pos:min1_sin_pos),1);
end;
if nulld1_sin_inhalt ~= 1
    Vout2_nullsuche_pos1=nulld1_sin_pos;
end;
nulld1_sin_pos=Vout2_nullsuche_pos1+max1_sin_pos;
%Zeitpunkt des ersten Nulldurchgangs
nulld1_sin_zeit=nulld1_sin_pos*(rec_time/rec_length);
nulld2_sin_pos=find(nulld_sin == Vout2(max2_sin_pos:min2_sin_pos),1);
nulld2_sin_groesse=size(nulld2_sin_pos);
nulld2_sin_inhalt=sum(nulld2_sin_groesse);
if nulld2_sin_inhalt == 1
    Vout2_nullsuche=Vout2-nulld_sin;
    Vout2_nullsuche_pos2=find(0.00001 >= ...
        Vout2_nullsuche(max2_sin_pos:1000000),1);
end;
if nulld2_sin_inhalt ~= 1
    Vout2_nullsuche_pos2=nulld2_sin_pos;
end;
nulld2_sin_pos=Vout2_nullsuche_pos2+max2_sin_pos;
%Zeitpunkt des zweiten Nulldurchgangs
nulld2_sin_zeit=nulld2_sin_pos*(rec_time/rec_length);

%Berechnung der Periodendauer auf Grundlage der Nulldurchgänge
T_sin_periode=nulld2_sin_zeit-nulld1_sin_zeit;
%Überprüfung ob eine Periodendauer ermittelt werden konnte

```

```

T_sin_periode_groesse=size(T_sin_periode);
T_sin_periode_inhalt=sum(T_sin_periode_groesse);
%Wenn Periodendauer gefunden wurde, normal weiter
if T_sin_periode_inhalt ~= 1
fprintf(1,...
    'Die_Periodendauer_des_SIN-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Sekunden_\n', ...
    T_sin_periode)
fprintf(1, '\n');
f_sin_periode=1/T_sin_periode;
fprintf(1,...
    'Die_Frequenz_des_SIN-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Hz_\n', ...
    f_sin_periode)
fprintf(1, '\n');
end;
%Wenn Periodendauer nicht gefunden wurde Ersatzwert einsetzen.
%Der Ersatzwert entspricht der theoretisch zu erwartenden Periodendauer bei
%optimalem Signalverlauf.
if T_sin_periode_inhalt == 1
    T_sin_periode=1/f_ersatz;
    fprintf(1,...
        'Die_Periodendauer_des_SIN-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Sekunden_\n', ...
        T_sin_periode)
    fprintf(1, '\n');
    f_sin_periode=1/T_sin_periode;
    fprintf(1,...
        'Die_Frequenz_des_SIN-Brückensignals_beträgt:_%6.4f_Hz_\n', ...
        f_sin_periode)
    fprintf(1, '\n');
end;

%% Berechnung der Phasenverschiebung zwischen COS- und SIN-Brückensignal.
%%Die Phasenverschiebung wird in Bezug auf das COS-Signal betrachtet!

%Differenz zwischen den Nulldurchgängen in Sekunden
phase_diff=nulld1_sin_zeit-nulld1_zeit;
%Umrechnung in eine °-Zahl
phase=(360*phase_diff)/T_cos_periode;

if phase< -200
    phase=phase+360;

```

```

end;

if phase > 200
    phase=phase-360;
end;
%Ausgabe der Phasenverschiebung
fprintf(1, ...,
    'Phasenverschiebung_(in_Bezug_auf_das_COS-Brückensignal):_%.6.4f°\n', ...,
    phase)
fprintf(1, '\n');

%% Berechnung des k-Faktors
%Hier werden die Amplituden zueinander in Verhältnis gesetzt.
%Bezugsgröße ist auch hier das COS-Brückensignal.

%Amplitude des COS-Signals
ampl_cos=Vout1_max-Vout1_min;
%Amplitude des SIN-Signals
ampl_sin=Vout2_max-Vout2_min;
%k-Faktor
k_faktor=ampl_cos/ampl_sin;
%Ausgabe k-Faktor
fprintf(1, 'Der_k-Faktor_beträgt:_%6.4f_\n', k_faktor)
fprintf(1, '\n');

%%
%THD Berechnung der Brückenausgangssignale
N = rec_length-1;           %Zählindex
T=rec_time;                %Aufzeichnungslänge in Sekunden
fs=N/T;                    %Abtastfrequenz
t = (0:1/fs:T);           %Zeitbasis des Referenzsignals
omega_n = 2*pi * fvout;    %Kreisfrequenz des Sensorsignals

%Fkt harmonics aufrufen zur FFT-Berechnung der
%Brückenausgangssignale Vout1 und Vout2. Es werden die ersten 10
%harmonischen Schwingungen errechnet und weiter verwendet.
Vout1_harmonics=harmonics(Vout1, fs, 1:10, 'debug', false, ...
    'tolerance', tol);
Vout2_harmonics=harmonics(Vout2, fs, 1:10, 'debug', false, ...
    'tolerance', tol);

```

```

% THD des COS-Brückensignals in Prozent
thd_Vout1 = sqrt( sum(Vout1_harmonics(1,2:10).^2)...
    / sum(Vout1_harmonics(1,1:10).^2) ) * 100;
% THD des COS-Brückensignals in dB
thd_Vout1_dB = 20 * log10(thd_Vout1 / 100);
% THD des SIN-Brückensignals in Prozent
thd_Vout2 = sqrt( sum(Vout2_harmonics(1,2:10).^2) / ...
    sum(Vout2_harmonics(1,1:10).^2) ) * 100;
% THD des SIN-Brückensignals in dB
thd_Vout2_dB = 20 * log10(thd_Vout2 / 100);

fprintf(1, ...
    'Der THD des COS-Brückensignals beträgt: %6.4f Prozent\n', thd_Vout1)
fprintf(1, '\n');
fprintf(1, ...
    'Der THD des COS-Brückensignals beträgt: %6.4f dB\n', thd_Vout1_dB)
fprintf(1, '\n');
fprintf(1, ...
    'Der THD des SIN-Brückensignals beträgt: %6.4f Prozent\n', thd_Vout2)
fprintf(1, '\n');
fprintf(1, ...
    'Der THD des SIN-Brückensignals beträgt: %6.4f dB\n', thd_Vout2_dB)
fprintf(1, '\n');

%%      Speicherung

%Speichermatrix für die THD-Werte der Brückenausgangssignale
COS_thd(b,c) = thd_Vout1;
SIN_thd(b,c) = thd_Vout2;

%Speichermatrix für den k-Faktor an bestimmten Messpositionen
k_faktor_matrix(b,c) = k_faktor;

%Speichermatrix für die Phasenverschiebung an bestimmter Messposition
phase_matrix(b,c) = phase;

%Speichermatrix der COS-Brücken-Offsetspannung
Vout1_offset_matrix(b,c) = Vout1_offset;

%Speichermatrix der SIN-Brücken-Offsetspannung

```

Vout2_offset_matrix(b,c)=Vout2_offset;

%Speichermatrix für 3. harmonische Oberwelle COS-Brücke

Vout1_3harm_matrix(b,c)=Vout1_harmonics(3);

%Speichermatrix für 3. harmonische Oberwelle SIN-Brücke

Vout2_3harm_matrix(b,c)=Vout2_harmonics(3);

%Speichermatrix für 5. harmonische Oberwelle COS-Brücke

Vout1_5harm_matrix(b,c)=Vout1_harmonics(5);

%Speichermatrix für 5. harmonische Oberwelle SIN-Brücke

Vout2_5harm_matrix(b,c)=Vout2_harmonics(5);

M-File zum Ansteuern der X-Achsen Motorisierung QSH4218

```

%
% M-File zum Ansteuern der x-Achse
%
%


---


function[deviceObj, interfaceObj] = Ansteuerung_XAchse

%Variablendeklaration
grad = 12800;
weg= 12800;

%Verbindungsaufbau
interfaceObj = instrfind('Name', 'Serial-COM4');

if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = serial('COM4');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end

%interfaceObj = serial('COM1');
deviceObj=icdevice('tmcl.mdd', interfaceObj);
connect(deviceObj);

%Ansteuerung der x-Achse
%set stepper parameters
set(deviceObj, 'motor', 2); %Ansteuerung der x-Achse
%set(deviceObj.Axis, 'absolute_max_current', 114); %Strombegrenzung
set(deviceObj.Axis, 'microstep_resolution', 6); %1 step = 0,00126 mm
set(deviceObj.Axis, 'maximum_positioning_speed', 100);
set(deviceObj.Axis, 'maximum_acceleration', 10); % set max speed
set(deviceObj.Axis, 'absolute_max_current', 90); % set max current
set(deviceObj.Axis, 'right_limit_switch_disable', 1); % enable switches
set(deviceObj.Axis, 'left_limit_switch_disable', 1); % enable switches
set(deviceObj.Axis, 'soft_stop_flag', 0); %disable soft stop for ref switch

```

M-File zum Ansteuern der Y-Achsen Motorisierung QSH4218

```

%
% M-File zum Ansteuern der y-Achse
%
%


---


function[deviceObj, interfaceObj] = Ansteuerung_YAchse

%Variablendeklaration
grad = 12800;
weg= 12800;

%Verbindungsaufbau
interfaceObj = instrfind('Name', 'Serial-COM4');

if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = serial('COM4');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end

%interfaceObj = serial('COM1');
deviceObj=icdevice('tmcl.mdd', interfaceObj);
connect(deviceObj);

%Ansteuerung der x-Achse
%set stepper parameters
set(deviceObj, 'motor', 1); %Ansteuerung der x-Achse
%set(deviceObj.Axis, 'absolute_max_current', 114); %Strombegrenzung
set(deviceObj.Axis, 'microstep_resolution', 6); %1 step = 0,00126 mm
set(deviceObj.Axis, 'maximum_positioning_speed', 100);
set(deviceObj.Axis, 'maximum_acceleration', 10); % set max speed
set(deviceObj.Axis, 'absolute_max_current', 90); % set max current
set(deviceObj.Axis, 'right_limit_switch_disable', 1); % enable switches
set(deviceObj.Axis, 'left_limit_switch_disable', 1); % enable switches
set(deviceObj.Axis, 'soft_stop_flag', 0); %disable soft stop for ref switch

```


M-File zum Ansteuern des Drehmesstisches DMT65

```

%
% M-File zum Ansteuern des Rotationstisches
%
%


---


%Variablendeklaration
grad = 800;

%Verbindungsaufbau
interfaceObj = instrfind('Name', 'Serial-COM4');

if isempty(interfaceObj)
    interfaceObj = serial('COM4');
else
    fclose(interfaceObj);
    interfaceObj = interfaceObj(1);
end

%interfaceObj = serial('COM1');
deviceObj=icdevice('tmcl.mdd', interfaceObj);
connect(deviceObj);

%Ansteuerung der x-Achse
%set stepper parameters
set(deviceObj, 'motor', 0);
set(deviceObj.Axis, 'microstep_resolution', 3);
set(deviceObj.Axis, 'maximum_acceleration', 10);
set(deviceObj.Axis, 'maximum_positioning_speed', 800);
%set(deviceObj.Axis, 'absolute_max_current', 12);
set(deviceObj.Axis, 'right_limit_switch_disable', 1);
set(deviceObj.Axis, 'left_limit_switch_disable', 1);
set(deviceObj.Axis, 'soft_stop_flag', 0);

%Ansteuerung der y-Achse
%1 step = 0,01008 mm
% set acceleration
% set max speed
% set max current
% enable switches
% enable switches
%disable soft stop for ref switch

% reference search
%first right switch then left switch
set(deviceObj.Axis, 'referencing_mode', 1);

% switch search speed
set(deviceObj.Axis, 'referencing_search_speed', 350);

```

% speed after finding switch

```
set(deviceObj.Axis, 'referencing_switch_speed', 350);
```

M-File zum Ansteuern des Oszilloskops

```

%
%
% Beschreibung: M-File zur Oszilloskop Ansteuerung
%
%
%
%


---



function[Vout1, Vout2, u_sin, u_cos, rec_time, rec_length] ...
    = Ansteuerung_Scope()
%% parameters

rec_length = 1e6;           % 1M Points Recordlength
rec_time = 10;             % 1.0s => 10ms/div
%% connection to scope
disp('Instrument_verbinden...');
% Create a VISA-USB object.
interfaceObj_scope = instrfind('tek', 'TCPIP::192.168.0.9::INSTR');

% Create the VISA-USB object if it does not exist
% otherwise use the object that was found.
if isempty(interfaceObj_scope)
    interfaceObj_scope = visa('tek', 'TCPIP::192.168.0.9::INSTR');
else
    fclose(interfaceObj_scope);
    interfaceObj_scope = interfaceObj_scope(1);
end

% Create a device object.
deviceObj_scope = icdevice('dpo4054.mdd', interfaceObj_scope);

% Connect device object to hardware.
connect(deviceObj_scope);
disp('Scope_connected');

%% set scope parameters

%Einstellungen Channel 1
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'State', 'on');
% signal offset voltage

```

```
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Offset', 1.25);  
% 20MHz Bandwidth  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'BandwidthLimit', 'twenty');  
% DC-Coupling  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Coupling', 'dc');  
% vertical gain u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Scale', 0.6);  
% needed for big display setting  
%set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Scale', 0.35);  
% vertical position u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Position', -4.0);  
% needed for big display setting  
%set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Position', -5.0);  
  
%Einstellungen Channel 2  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'State', 'on');  
% signal offset voltage  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Offset', 1.25);  
% 20MHz Bandwidth  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'BandwidthLimit', 'twenty');  
% DC-Coupling  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Coupling', 'dc');  
% vertical gain u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Scale', 0.6);  
% needed for big display setting  
%set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Scale', 0.35);  
% vertical position u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Position', -4.0);  
% needed for big display setting  
%set(deviceObj_scope.Channel(1), 'Position', -5.0);  
  
%Einstellungen Channel 3  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'State', 'on');  
% signal offset voltage  
%set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Offset', 1.25);  
% 20MHz Bandwidth  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'BandwidthLimit', 'twenty');  
% DC-Coupling  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Coupling', 'dc');  
% vertical gain u_diff
```

```
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Scale', 10.0);  
% needed for big display setting  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Scale', 0.25);  
% vertical position u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Position', 0.0);  
% needed for big display setting  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Position', -5.0);  
  
%Einstellungen Channel 4  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'State', 'on');  
% signal offset voltage  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Offset', 1.25);  
% 20MHz Bandwidth  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'BandwidthLimit', 'twenty');  
% DC-Coupling  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Coupling', 'dc');  
% vertical gain u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Scale', 10.0);  
% needed for big display setting  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Scale', 0.25);  
% vertical position u_diff  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Position', 0.0);  
% needed for big display setting  
set(deviceObj_scope.Channel(3), 'Position', -5.0);  
  
% 400ms/div  
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Timebase', rec_time/10);  
% Mode: High Resolution  
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Mode', 'highres');  
% singleshot-mode  
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'Control', 'single');  
  
% set triggersource ch1  
set(deviceObj_scope.Trigger, 'Source', 'channel1');  
% set trigger coupling: dc  
set(deviceObj_scope.Trigger, 'Coupling', 'dc');  
% set trigger-level at 1.25V  
set(deviceObj_scope.Trigger, 'Level', 1.25);  
% set trigger type: edge  
set(deviceObj_scope.Trigger, 'TriggerType', 'edge');
```

```
% set trigger at rising edge
set(deviceObj_scope.Trigger, 'Slope', 'rising');

set(deviceObj_scope.Waveform, 'MaxNumberPoint', rec_length);
set(deviceObj_scope.Waveform, 'FirstPoint', 1);
set(deviceObj_scope.Waveform, 'EndingPoint', rec_length);

disp('Scope_adjusted');

%% Get Data from Demo-Board and Scope

% capture data from Scope
fprintf('Scope_start_singleshot_..._');
% start singleshot
set(deviceObj_scope.Acquisition, 'state', 'run')
% wait for recording
pause(11* get(deviceObj_scope.Acquisition, 'timebase'));

%signal u_diff, channel 1
[Vout1, temp1, ...
 Vout1_unit, temp2] = invoke(deviceObj_scope.Waveform, ...
 'readwaveform', 'channel1');

[Vout2, temp1, ...
 Vout2_unit, temp2] = invoke(deviceObj_scope.Waveform, ...
 'readwaveform', 'channel2');

[u_sin, temp1, ...
 u_sin_unit, temp2] = invoke(deviceObj_scope.Waveform, ...
 'readwaveform', 'channel3');

[u_cos, temp1, ...
 u_cos_unit, temp2] = invoke(deviceObj_scope.Waveform, ...
 'readwaveform', 'channel4');

fprintf('finished\n');

%% close
disconnect(deviceObj_scope);
```

```
delete ( deviceObj_scope );  
delete ( interfaceObj_scope );
```

M-File zur Harmonischen Berechnung

```

%HARMONICS Harmonics in the signal val
%
% val:      signal
% fs:      sample frequency in Hz
% orders:  vector which include the orders to be calculated
%
% optional parameters:
%  freq:    fundamental frequency
%  tolerance: search tolerance for frequencies in Hz
%  debug:   enable debug output
%

```

```

function [res] = harmonics(val, fs, orders, varargin)

```

```

debug=false;

```

```

fundamental_freq=0;

```

```

n_fft=length(val);

```

```

freq_res=fs/n_fft;

```

```

% tolerance range for searching harmonics

```

```

harm_tol=round(1/freq_res);

```

```

if mod(size(varargin,2), 2)>0

```

```

    error('invalid_number_of_arguments');

```

```

end

```

```

for i=1:2:size(varargin,2)

```

```

    switch lower(varargin{i})

```

```

        case 'freq'

```

```

            fundamental_freq = varargin{i+1};

```

```

        case 'debug'

```

```

            debug = (varargin{i+1})>0;

```

```

        case 'tolerance'

```

```

            % convert frequency to sample value

```

```

            harm_tol=round(varargin{i+1}/freq_res);

```

```

        otherwise

```

```

            error('invalid_argument');

```

```

    end

```


end

```

magnitudes=zeros(1, length(orders));
phases=zeros(1, length(orders));
frequencies=zeros(1, length(orders));

val_spec=fft(val)./n_fft;
val_mag=abs(val_spec);
val_phase=angle(val_spec);
%val_f=fs/2*linspace(0,1,n_fft/2); % —>
val_f=freq_res*(0:1:(n_fft/2)-1);

val_mag_half=val_mag(1:n_fft/2).*2;
val_phase_half=val_phase(1:n_fft/2);

% remove dc
val_mag_half(1)=0;

if fundamental_freq > 0
    % find matching frequency
    [fundamental_center_min, fundamental_center_i]= ...
        min(abs(val_f-fundamental_freq));
    if fundamental_center_min > 5
        error('specified_frequency_not_found');
    end
    [dummy, fundamental_i]= ...
max(val_mag_half(fundamental_center_i-harm_tol:fundamental_center_i+ ...
harm_tol));
    fundamental_i=fundamental_i+fundamental_center_i-harm_tol-1;

    if (val_mag_half(fundamental_i)/max(val_mag_half)*100) < 5
        error('your_specified_frequency_seems_to_be_wrong');
    end
else
    [dummy, fundamental_i]=max(val_mag_half);
end

if debug
    display(['val_f@fundamental_i(1):_' num2str(val_f(fundamental_i))...
        '_Hz']);

```

```
display(['val_mag_half@fundamental_i(1):_ ' ...
        num2str(val_mag_half(fundamental_i)) '_ ']);
display(['val_phase_half@fundamental_i(1):_ ' ...
        num2str(val_phase_half(fundamental_i)) '_rad ']);
end

for i=1:length(orders)
    % calculate the approx. position
    order_center_i=round(fundamental_i*orders(i));

    % find the max in a spec. range
    [dummy, order_i]= ...
        max(val_mag_half(order_center_i-harm_tol:order_center_i+harm_tol));
    % calculate real index in the whole vector
    order_i=order_i+order_center_i-harm_tol-1;

    magnitudes(i)=val_mag_half(order_i);
    phases(i)=val_phase_half(order_i);
    frequencies(i)=val_f(order_i);
end

if debug
    plot(val_f(1:3000),val_mag_half(1:3000));
end

res=[magnitudes; ...
     phases;...
     frequencies];

end
```

M-File mit Plot-Routine

```

%
%           M-File zum plotten
%           Inhalt: – Plot der HD-Historie Vout1
%                   – Plot des Offset von Vout1
%                   – Plot der 3. Harmonischen von Vout1
%                   – Plot der 5. Harmonischen von Vout1
%


---


%% Plot für die HD-Werte
figure(1)
%Plot durch imagesc() erstellen
imagesc(x_coord,y_coord,10*log10(COS_thd)) %HD-Plot
%Titel und Achsenbeschriftung einfüegen
title('Klirrfaktor_COS-Messbrücke_in_dB');
xlabel('X-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm');
ylabel('Y-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm');
%Achsenbegrenzung einfuehren
axis([x_coord(1) x_coord(end) y_coord(1) y_coord(end)])
%Achseneinteilung setzen
set(gca, 'xtick', x_coord);
set(gca, 'xticklabel', x_coord);
set(gca, 'ytick', y_coord);
set(gca, 'yticklabel', y_coord);
axis image;
colorbar_handle=colorbar();
set(get(colorbar_handle, 'title'),'string','dB');

%% Plot des Offset von Vout1
figure(2)
%Plot durch imagesc() erstellen
imagesc(x_coord,y_coord,Vout1_offset_matrix) %Offset-Plot
%Titel und Achsenbeschriftung einfüegen
title('Offset_COS-Messbrücke_in_V');
xlabel('X-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm');
ylabel('Y-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm');
%Achsenbegrenzung einfuehren
axis([x_coord(1) x_coord(end) y_coord(1) y_coord(end)])
%Achseneinteilung setzen
set(gca, 'xtick', x_coord);

```

```

set(gca, 'xticklabel', x_coord);
set(gca, 'ytick', y_coord);
set(gca, 'yticklabel', y_coord);
axis image;
colorbar_handle=colorbar();
set(get(colorbar_handle, 'title'), 'string', 'V');

%% Plot der 3. Harmonischen von Vout1
%Signal aufbereiten, Umrechnung auf Spannungswerte
fsample=100000; %Abtastfrequenz Oszilloskop
fvout=4; %Frequenz Winkelsensor
delta_t=1/fsample; %Abtastzeit
periode_signal=1/fvout; %Peridendauer Signal
N=periode_signal/delta_t;

%Plot erstellen
figure(3)
%Plot durch imagesc() erstellen
imagesc(x_coord, y_coord, Vout1_3harm_matrix/N) %3. Harmonische-Plot
%Titel und Achsenbeschriftung einfuegen
title(' Klirrfaktor_3.harm_COS-Messbruecke_in_V');
xlabel('X-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm');
ylabel('Y-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm');
%Achsenbegrenzung einfuehren
axis([x_coord(1) x_coord(end) y_coord(1) y_coord(end)])
%Achseneinteilung setzen
set(gca, 'xtick', x_coord);
set(gca, 'xticklabel', x_coord);
set(gca, 'ytick', y_coord);
set(gca, 'yticklabel', y_coord);
axis image;
colorbar_handle=colorbar();
set(get(colorbar_handle, 'title'), 'string', 'mV');

%% Plot der 5. harmonischen von Vout1
%Plot erstellen
figure(4)
%Plot durch imagesc() erstellen
imagesc(x_coord, y_coord, Vout1_5harm_matrix/N) %5. Harmonische-Plot
%Titel und Achsenbeschriftung einfuegen

```

```

title ( ' Klirrfaktor_5.harm_COS-Messbrücke_in_V' );
xlabel ( 'X-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm' );
ylabel ( 'Y-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm' );
%Achsenbegrenzung einfuehren
axis ([x_coord(1) x_coord(end) y_coord(1) y_coord(end)])
%Achseneinteilung setzen
set(gca, 'xtick', x_coord);
set(gca, 'xticklabel', x_coord);
set(gca, 'ytick', y_coord);
set(gca, 'yticklabel', y_coord);
axis image;
%Beschriftung der colorbar einfuegen
colorbar_handle=colorbar ();
set(get(colorbar_handle, 'title'), 'string', 'mV');

%% Plot für die HD-Werte (3D)
figure(10)
%Plot durch surf() erstellen
surf(x_coord, y_coord, 10*log10(COS_thd)) %HD-Plot
%Titel und Achsenbeschriftung einfuegen
title ( ' Klirrfaktor_COS-Messbrücke_in_dB' );
xlabel ( 'X-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm' );
ylabel ( 'Y-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm' );
%Achsenbegrenzung einfuehren
axis ([x_coord(1) x_coord(end) y_coord(1) y_coord(end)])
%Achseneinteilung setzen
set(gca, 'xtick', x_coord);
set(gca, 'xticklabel', x_coord);
set(gca, 'ytick', y_coord);
set(gca, 'yticklabel', y_coord);
axis image;
colorbar_handle=colorbar ();
set(get(colorbar_handle, 'title'), 'string', 'dB');

%% Plot 3D
figure(11)
%Plot durch surf() erstellen
surf(x_coord, y_coord, V1_HD_dB) %HD-Plot
%Titel und Achsenbeschriftung einfuegen
title ( ' Klirrfaktor_COS-Messbrücke_in_dB' );

```

```
xlabel ( 'X-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm' );  
ylabel ( 'Y-Achse_Kreuzspulenkasten_in_mm' );  
%Achsenbegrenzung einfuehren  
axis ([x_coord(1) x_coord(end) y_coord(1) y_coord(end)])  
%Achseneinteilung setzen  
set(gca, 'xtick', x_coord);  
set(gca, 'xticklabel', x_coord);  
set(gca, 'ytick', y_coord);  
set(gca, 'yticklabel', y_coord);  
axis image;  
colorbar_handle=colorbar ();  
set(get(colorbar_handle, 'title'), 'string', 'dB');
```

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §25(4) ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 24.März 2011

Ort, Datum

Unterschrift