

# Masterarbeit

Stefan Zippel

Analyse des magnetischen Systems eines ABS-Sensors - Feldsimulation, automatisierte Kennfeldmessung, Signalsynthese -

Stefan Zippel

Analyse des magnetischen Systems eines ABS-  
Sensors - Feldsimulation, automatisierte  
Kennfeldmessung, Signalsynthese -

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung  
im gemeinsamen Studiengang Mikroelektronische Systeme  
am Fachbereich Technik  
der Fachhochschule Westküste  
und  
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.-Ing. Alfred Ebberg

Abgegeben am 15. Dezember 2011

**Stefan Zippel**

**Thema der Masterarbeit**

Analyse des magnetischen Systems eines ABS-Sensors - Feldsimulation, automatisierte Kennfeldmessung, Signalsynthese -

**Stichworte**

Anisotroper magnetoresistiver Effekt, Kennfelderfassung, Feldsimulation, Matlab, Datensynthese, Kreuzspulenmessplatz, AMR, ABS, Sensor

**Kurzzusammenfassung**

Vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, ob eine Simulation des Teilsystems aus ABS-Sensor und Encoder die gleichen Ergebnisse wie eine Messung liefert und damit die physische Konstruktion dieses Teilsystems entbehrlich macht. Dafür werden zunächst die drei wesentlichen Schritte Vermessung von Sensoren, magnetostatische Simulation eines Sensor-Encoderrad-Systems sowie Synthese des Sensorausgangssignals durchgeführt. Durch einen darauf aufbauenden Vergleich der synthetisierten mit den gemessenen Ausgangsspannungen der ABS-Sensoren soll die Frage abschließend beantwortet werden.

**Stefan Zippel**

**Title of the master thesis**

Analysis of the magnetical system of an ABS sensor - Field simulation, automatic measurement, signal synthesis -

**Keywords**

Anisotropic magnetoresistance, AMR, field simulation, signal synthesis, cross coil measurement

**Abstract**

This paper deals with the question whether a simulation of the subsystem made of ABS sensor and encoder provides the same results as a measurement, and thus makes the physical design of this subsystem dispensable. Therefore, three main steps, consisting of measurement of sensors, magneto-static simulation of the sensor encoder wheel system and synthesis of the sensor output signal are performed. On this basis, the question will be answered conclusively by comparing the synthesized with the measured output voltages of the ABS sensors.

## Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider, der mir als betreuender Prüfer ermöglicht hat, diese Masterarbeit zu erstellen, gern kreative Ideen lieferte und stets engagiert war. Weiterhin bedanke ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfred Ebberg für seine Arbeit als Zweitgutachter.

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. (FH) Martin Krey für seinen fachlichen Rat und seine tatkräftige Unterstützung. Außerdem bedanke ich mich bei dem gesamten Forschungsteam des Projektes ESZ-ABS und BATSEN, das durch ihr kollegiales Auftreten eine angenehme Arbeitsumgebung geschaffen hat. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Klaus Opalka vom Department Maschinenbau und Produktion an der HAW-Hamburg, der die Messungen am Drei-Koordinatenmessgerät Leitz PMM 654 durchgeführt hat. Außerdem danke ich der Firma NXP Semiconductors GmbH, die mir ermöglicht hat, eine Drei-Achsen-Feldstärkemessung durchzuführen.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die dazu beigetragen hat, mein Studium zu ermöglichen.

Zum Schluss bedanke ich mich bei meiner Freundin für ihre Geduld und ihre Unterstützung bei der Korrektur dieser Arbeit.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation und Ziel .....	1
1.2 Einordnung .....	1
1.3 Vorgehensweise .....	2
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Das Antiblockiersystem .....	5
2.2 Magnetismus .....	7
2.2.1 Ursachen des Magnetismus .....	7
2.2.2 Magnetismus in Materie .....	10
2.3 Der anisotrope magnetoresistive Effekt .....	17
2.4 Grundsätzlicher Aufbau eines AMR-Sensors .....	23
2.5 Der ABS Sensor .....	29
<b>3 Kreuzspulenmessplatz zur Sensorcharakterisierung</b> .....	<b>34</b>
3.1 Aufbau und Anforderungen .....	34
3.2 Simulation .....	37
3.3 Konstruktion .....	40
3.4 Kennfeldvermessung der ABS-Messbrücke .....	47
3.4.1 Kennfelderfassung ohne Stützmagnet .....	50
3.4.2 Kennfelderfassung mit Stützmagnet .....	53
3.4.3 Verbesserung der Auflösung des Kennfeldes .....	54
<b>4 Charakterisierung von Encoderrädern</b> .....	<b>57</b>
4.1 BMW 3er Encoderrad .....	57
4.2 Golf 4 Encoderrad .....	60
4.3 Vermessung eines aktiven Encoderrades .....	61
4.3.1 Magnetfeldmessung mit einer 1D-Hallsonde .....	61
4.3.2 Magnetfeldmessung mit einer 3D-Hallsonde .....	63
4.4 Zusammenfassung .....	64
<b>5 Magnetostatische Simulation mit der Software CST EM Studio</b> .....	<b>66</b>
5.1 Modellierung eines aktiven Encoderrades .....	67
5.1.1 Kreisförmiges Encoderradmodell mit rechteckigen Magneten .....	71
5.1.2 Kreisförmiges Encoderradmodell mit trapezartigen Magneten .....	73
5.1.3 Zusammenfassung .....	75

---

5.2	Modellierung der passiven Encoderräder .....	75
5.3	Modellierung des ABS Sensors .....	77
5.4	Modell des Gesamtsystems aus ABS-Sensor und Encoderrad.....	79
<b>6</b>	<b>Synthese der Brückenspannung aus Simulationsergebnissen.....</b>	<b>82</b>
6.1	Auswertung der simulierten Feldstärken.....	82
6.2	Darstellung der Syntheseergebnisse .....	91
6.3	Auswahl der Simulationssetups .....	93
6.4	Fehlerquellen und Toleranzen des Messsystems.....	94
<b>7</b>	<b>Auswertung der Syntheseergebnisse.....</b>	<b>96</b>
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>106</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>108</b>
	<b>Anhang A Mess- und Simulationsergebnisse.....</b>	<b>110</b>
	Auszug aus den Syntheseergebnissen des BMW 3er Encoderrades.....	126
	Auszug aus den Syntheseergebnissen des Golf 4 Encoderrades .....	136
	Auszug aus den Syntheseergebnissen des Golf 5 Encoderrades .....	147
	<b>Anhang B Programmcode.....</b>	<b>159</b>
	B.1 Matlab-Code .....	159
	B.2 VBA-Code.....	180
	<b>Anhang C Technische Zeichnungen .....</b>	<b>185</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1: Struktur des Themenkomplexes und der Vorgehensweise der Masterarbeit.....	3
2.1 Systembild einer Bremsanlage mit Antiblockiersystem nach [1].....	5
2.2: Modell atomarer Kreisströme nach [2].....	11
2.3: Kreisströme im Inneren und am äußeren Rand eines Zylinders nach [2].....	11
2.4: Schematische Darstellung Weiß'scher Bezirke nach [2] .....	14
2.5: Magnetisierung des ferromagnetischen Stabs als Funktion des äußeren Feldes der Spule nach [2] .....	15
2.6: Magnetische Eigenschaften ferromagnetischer Stoffe nach [4] .....	16
2.7: Prinzip des AMR-Effekts nach [5] .....	17
2.8: Geometrie eines dünnen Films mit seiner Magnetisierung nach [6] .....	19
2.9: Stoner-Wohlfarth-Astroid nach [6].....	22
2.10: Hysteresekurven der Magnetisierungen parallel zur easy axis ( $H_x$ ) und hard axis ( $H_y$ ) [6].....	22
2.11: Widerstandsänderung eines einfachen AMR-Sensors abhängig vom von außen angelegten Feld nach [5] und [6] .....	24
2.12: Drehung eines Sensorelementes um die easy axis nach [6] .....	26
2.13: Linearisierter AMR-Sensor mit Barberpole-Struktur und dazugehöriger Widerstandsänderungs-Kennlinie nach [5] und [6] .....	27
2.14: Wheatstone-Messbrücke aus Barberpole-Widerstandselementen nach [6].....	28
2.15: Geometrische Eigenschaften eines Barberpoles im Detail nach [6].....	30
2.16: Struktureller Aufbau des ABS-Sensors nach [14] .....	31
2.17: ABS-Sensor für passive Encoder (links) und für aktive Encoder (rechts) nach [7][8] .....	32
2.18: Prinzip von passiven und aktiven Encodern nach [9].....	32
2.19: Ausgangssignal der AMR-Messbrücke bei verschiedenen Encoderradpositionen bei einem passiven Encoder nach [9] .....	33
3.1: Aufbau des Kreuzspulenmessplatzes zur Vermessung von ABS-Sensoren nach [13] .....	34

---

3.2: Helmholtz-Spulen-Anordnung nach [2] .....	35
3.3: CST-Modell des Kreuzspulenkastens "Klein" mit Luftspulen .....	38
3.4: Feldverteilung im Kreuzspulenkasten "Klein" bei 1A Spulenstrom, Isolinien im Zentrum zeichnerisch ergänzt .....	39
3.5: Simulierte Feldverteilung im Kreuzspulenkasten mit 27mm <sup>3</sup> Messbox in der Mitte .....	44
3.6: Gleichförmige Richtung des Magnetfeldes innerhalb der Messbox auf drei Ebenen .....	45
3.7: Konzept des neuen Kreuzspulenkastens als 3D-Modell.....	46
3.8: Umsetzung des neuen Kreuzspulenkastens .....	46
3.9: Gemessene Feldverteilung im Kreuzspulenkasten bei Nullpunktsuche .....	48
3.10: Ergebnis der Spulenfaktormessung bei verschiedenen Strömen .....	49
3.11: Schematische Darstellung der Feldstärkenansteuerung der X- und Y-Achse zur Kennfelderzeugung .....	50
3.12: Ergebnis der Kennfelderfassung mit Dreieckfeld und Überlagerung .....	51
3.13: Ergebnis der Kennfeldmessung sortiert nach den Zuständen des Magnetfeldes... 52	
3.14: Ergebnis einer Kennfeldmessung durch Bildung des Mittelwertes an jedem Punkt, nichtlineare Kennlinien sind für konstante gesetzte $HX$ -Werte[23].....	53
3.15: Kennfelder des AMR-Sensors mit Stützmagneten für passive Encoder (links) und aktive Encoder (rechts) (Offsetlinien zeichnerisch ergänzt).....	54
3.16: Beispiel eines Vergleichs der theoretischen Kennlinie nach [6] mit einer im Kreuzspulenkasten gemessenen tatsächlichen Kennlinie .....	55
4.1: BMW 3er Encoderrad.....	57
4.2: Messprinzip der Vermessung von Strukturen mit abgerundeten Flanken.....	58
4.3: Übersicht Vermessung des BMW 3er Encoderrades.....	59
4.4: Messergebnis des BMW 3er Encoderrades in Polarkoordinaten .....	59
4.5: Golf 4 Encoderrad [16] .....	60
4.6: Golf 5 Encoderrad.....	61
4.7: Messergebnis der Feldstärkenbestimmung des Golf 5 Encoder (beschädigt), Sonde in Z-Richtung noch nicht in korrekter Lage .....	62
4.8: Messergebnis der Feldstärkenbestimmung des Golf 5 Encoder (neu), Abweichungen der Phasenbeziehung auf Grund des Messverfahrens wahrscheinlich ..	63

---

4.9: Ergebnis der Encodervermessung mit einem 3D-Gaussmeter, drei Zähne in hoher Auflösung.....	64
5.1: Magnetscheiben-Modell zum Nachbilden eines Sinusverlaufes .....	67
5.2: Simulationsergebnis des Magnetscheiben-Modells, Magnetfeld direkt auf dem Magneten .....	68
5.3: Simulationsergebnis des Magnetscheiben-Modells, Magnetfeld in einer Höhe von 1mm über dem Magneten .....	69
5.4: Magnetmodell mit weniger Scheiben .....	70
5.5: Simulationsergebnis des Magnetscheiben-Modells mit weniger Scheiben.....	71
5.6: Magnetmodell mit kreisförmig angeordneten Magneten .....	72
5.7: Simulationsergebnisse kreisförmige Rechteckmagneten .....	73
5.8: Fertiges Modell des aktiven Encoderrades .....	74
5.9: Simulationsergebnisse kreisförmige Trapezmagneten .....	74
5.10: Modell des Golf 4 Encoderrades .....	76
5.11: Modell des BMW 3er Encoderrades.....	77
5.12: Modell des ABS-Sensors für passive und aktive Encoder .....	78
5.13: Modelle der Gesamtsysteme aus Sensor und Encoder .....	79
5.14: Modellkoordinatensystem nach [17] .....	80
6.1: Schematischer Ablauf der Auswertung eines Simulationsergebnisses .....	82
6.2: Vorgehensweise bei Synthese der Spannung eines Brückenwiderstandes.....	84
6.3: Spannungsverlauf entlang einer Ellipse im Sensorkennfeld .....	84
6.4: Exemplarischer synthetisierter Brückenspannungsverlauf.....	85
6.5: Ablauf der Suche nach der besten Periode .....	86
6.6: Graphische Benutzeroberfläche für die Auswertung von Simulationsdaten.....	89
6.7: Aufbau der Ergebnisgraphik.....	91
6.8: Beispiel einer Ergebnisgraphik nach vorgestelltem Schema.....	92
6.9: Exemplarisches Ergebnis einer Messung am Radmessplatz bei einer Verkippung um die Y-Achse des Golf 4 Encoderrades nach [16].....	93
7.1: Syntheseergebnis einer normalen Einbaulage .....	97
7.2: Syntheseergebnis bei zu geringem Abstand zwischen Sensor und Encoderrad .....	98

---

7.3: Schematische Darstellung der Ursache einer verzerrten Brückenspannung nach [18] .....	99
7.4: Syntheseergebnis bei Verkipfung des Sensors um die Z-Achse.....	100
7.5: Syntheseergebnis bei starker Verkipfung des Sensors um die Y-Achse .....	101
7.6: Schematische Darstellung einer Ellipse im 3D-Kennfeld .....	102
7.7: Syntheseergebnis bei starker Verkipfung des Sensors um die X-Achse .....	103
7.8: Syntheseergebnis bei entfernterer Einbaulage.....	104
8.1: Zusammenfassung typischer Kurvenverläufe der Brückenausgangsspannung .....	106

## Tabellenverzeichnis

3-1: Übersicht über die technischen Eigenschaften der Kreuzspulenkästen nach [10] ..	36
3-2: Vergleich der Spulenströme für eine Magnetfeldstärke von 50kA/m.....	37
3-3: Vergleich der gemessenen mit den simulierten Spulenfaktoren .....	40
3-4: Auswahl an Gleichstromwiderständen von Kupferdraht bei 20°C .....	41
3-5: Simulationsergebnisse des Kreuzspulenkastens bei einem Innenabstand von 51mm mit der maximal erreichbaren Feldstärke für $U_{max} = 36V$ , $I_{max} = 2,5A$ .....	42
3-6: Simulationsergebnisse des Kreuzspulenkastens bei einem Innenabstand von 36mm mit der maximal erreichbaren Feldstärke für $U_{max} = 36V$ , $I_{max} = 2,5A$ .....	43
3-7: Simulationsergebnisse der Homogenitätsbetrachtung des Kreuzspulenkastens .....	44
3-8: Winkel der Feldvektoren innerhalb der 3mm hohen Messbox .....	45

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
AMR	Anisotroper magnetoresistiver Effekt
ASIC	Application specific integrated circuit
bzw.	beziehungsweise
CST	CST EM Studio, Software
FEM	Finite Elemente Methode
FHW	Fachhochschule Westküste Heide
Gl.	Gleichung
GUI	Graphical User Interface, Graphische Benutzeroberfläche
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
HD5	Harmonic Distortion 5
HDI	Harmonic Distortion Infinite
HDI <sub>s</sub>	Harmonic Distortion Infinite, abgewandelt
IC	Integrierter Schaltkreis, engl. integrated circuit
KFZ	Kraftfahrzeug
KSpK	Kreuzspulenkasten
KSMP	Kreuzspulenmessplatz
NTC	Negative Temperature Coefficient, Heißleiter
PKW	Personenkraftwagen
RMP	Radmessplatz
vgl.	vergleiche



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Ziel

Die Sicherheit im Straßenverkehr war und ist eines der entscheidenden Kriterien bei der Auslegung und Gestaltung von Kraftfahrzeugen (KFZ). Einen wesentlichen Anteil an der Verringerung der Unfälle mit schwerwiegenden Folgen hat dabei das Antiblockiersystem (ABS). Voraussetzung für die Funktionsweise des ABS ist die Überwachung der Umdrehungsgeschwindigkeit sowie der Drehrichtung jedes Rades. Zwei der bedeutendsten Sensoren, die dies leisten, sind der KMI18/2 und der KMI22/1 der Firma NXP Semiconductors GmbH. Gemeinsam mit dem ABS-Sensor zählt der Encoder zu einem bedeutenden Bestandteil des ABS. Vorliegende Arbeit befasst sich daher mit der Frage, ob eine Simulation des Teilsystems aus Sensor und Encoder die gleichen Ergebnisse wie eine Messung liefert und damit die physische Konstruktion dieses Teilsystems in der Forschung und Entwicklung entbehrlich macht. Basis hierfür ist ein von Krey und Riemschneider in [14] vorgestelltes Verfahren.

Entsprechend der Motivation dieser Arbeit beinhaltet die Zielstellung zunächst die Kennfelderfassung des genannten Sensortyps, die magnetostatische Simulation des Verhaltens des Sensor-Encoder-Systems sowie die Synthese des Sensorausgangssignals. Dabei geht der Kennfeldvermessung die Konstruktion einer Kreuzspulenanordnung und der Simulation die Modellierung mehrerer Encoderräder sowie des Sensortyps selbst voraus. Vervollständigt wird die Zielstellung durch den Vergleich der Syntheseresultate mit den bereits vorliegenden Messergebnissen aus [16].

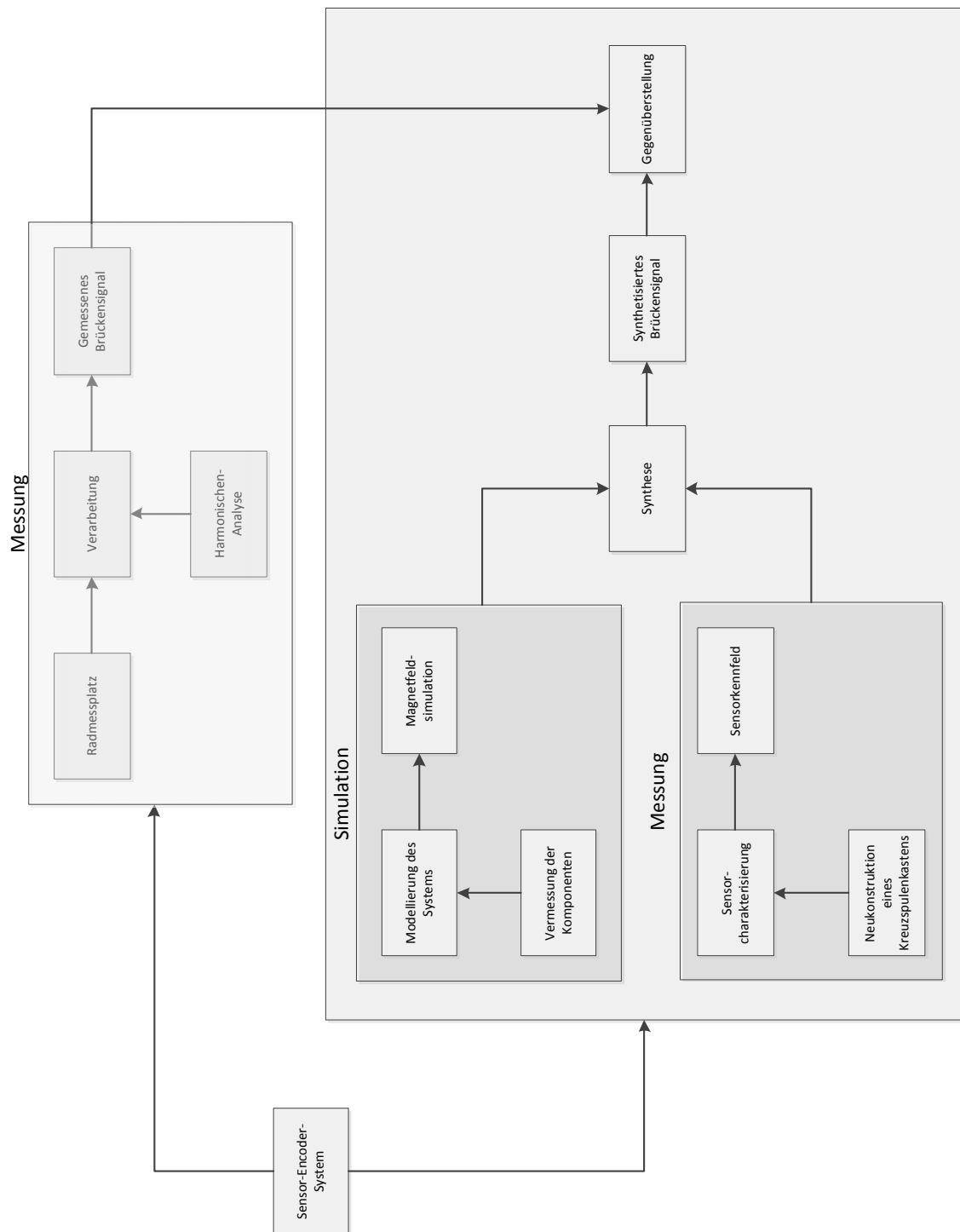
## 1.2 Einordnung

Die vorliegende Arbeit ist Teil eines Gesamtprojekts, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Namen „ESZ-ABS“ gefördert wird. Grundlegende Überlegung zur Initiierung dieses Projekts ist, dass die genannten ABS-Sensoren, die aus einer AMR-Messbrücke (im Folgenden als Sensor bezeichnet) und einer ASIC-Einheit bestehen, nur begrenzt Informationen über den Einbauzustand des Sensors mittels eines digitalen Protokolls ausgeben. In diesem Protokoll stehen drei Bit zur Verfügung, um eine genauere Information zu codieren. Ziel des Projekts ist es daher, genauere Indikatoren für den Zustand dieser Sensoren zu finden und diese mit möglichst wenig Aufwand zu bestimmen. Diese Informationen können dazu dienen, die Diagnosefunktion zu verbessern.

In vorangegangenen Abschlussarbeiten wird der Aspekt der messtechnischen Erfassung des ABS-Sensoren-Encoderrad-Systems mit dem KMI18/2 und dem KMI22/1 auf verschiedene Weise verfolgt. Dafür wird von Schörmer in [17] ein Radmessplatz (RMP) entworfen, der eine Vermessung der Sensoren mit einer hohen Genauigkeit ermöglicht. Hier kommen verschiedene Encoderräder zur Anwendung. In [18] wird von Jegenhorst eine Demonstrationsplattform vorgestellt, mit der die Signale der Sensoren verarbeitet und untersucht werden können. Hier wird unter anderem eine Unterabtastung des Sensorsignals vorgestellt, um eine hardwaresparende Auswertung dieses Signals vornehmen zu können. Auf diese Arbeit aufbauend stellt Koch in [20] eine aufwandsminimierte Schätzung von Harmonischen zur Zustandsbestimmung von ABS-Sensoren vor. Ebenfalls an [18] anknüpfend wird das Demonstratorsystem von Stahl in [22] um ein Controllersystem zur Offsetkompensierung erweitert. Die Demonstrationsplattform wird zudem von Ivanov in [16] unter Verwendung des bereits erwähnten RMP dazu genutzt, eine Vermessung der Sensoren durchzuführen. Außerdem wird hier untersucht, ob die Harmonischen-Analyse einen Aufschluss über die Einbaulage der Sensoren liefert. Die Implementierung und Verifikation von verschiedenen Algorithmen zur Zustandserkennung der ABS-Sensoren wird von Poppinga in [19] vorgestellt. Darüber hinaus beschreibt Siebenmorgen in [11] die Erstellung und Verwendung von Kreuzspulenkästen zur Charakterisierung dieses Sensortyps, wobei hier allerdings nicht das Gesamtsystem, sondern lediglich der Sensor betrachtet wird. Da das Gesamtsystem aus Encoderrad und Sensor im Rahmen des Projektes bislang nicht weiter charakterisiert wurde, wird in dieser Arbeit auf die Ergebnisse der genannten Abschlussarbeiten zurückgegriffen und ein neuer Ansatz, der der Simulation, verfolgt.

### 1.3 Vorgehensweise

Unter Einbezug der eben erläuterten Einordnung des Themas in den Verlauf des Projektes visualisiert Bild 1.1 sowohl den zu bearbeitenden Themenkomplex als auch die Vorgehensweise dieser Masterarbeit. Dabei wurde der im oberen Teil gezeigte Bereich „Messung“ in den zuvor erwähnten Abschlussarbeiten bearbeitet. Im unteren Teil sind die Tätigkeiten zusammengefasst, die in der vorliegenden Arbeit behandelt werden, um das Sensor-Encoderrad-System zu charakterisieren. Hierfür werden im Wesentlichen drei Schritte benötigt. Als erster das Vermessen der Sensoren, als zweiter die magnetostatische Simulation des Systems und als letzter Schritt die Synthese des Sensorausgangssignals, bei der die Daten aus den ersten beiden Schritten zur Anwendung kommen.



1.1: Struktur des Themenkomplexes und der Vorgehensweise der Masterarbeit

Die verwendeten Sensoren nutzen den anisotropen magnetoresistiven Effekt (AMR-Effekt). Durch diesen ist es möglich, die Änderung eines Magnetfeldes zu messen. Die Funktionsweise wird in Kapitel 2 umfassend beschrieben. Der Zielstellung folgend ist es zunächst nötig, das elektrische Verhalten des Sensors möglichst exakt vorhersagen zu können. Um dies zu gewährleisten, wird dieser in einem geeigneten Messaufbau untersucht und charakterisiert. Hierfür wird ein Kreuzspulenkasten (KSpK), wie er bereits von Siebenmorgen in [11] vorgestellt wurde, neu entworfen. Bei der Auslegung

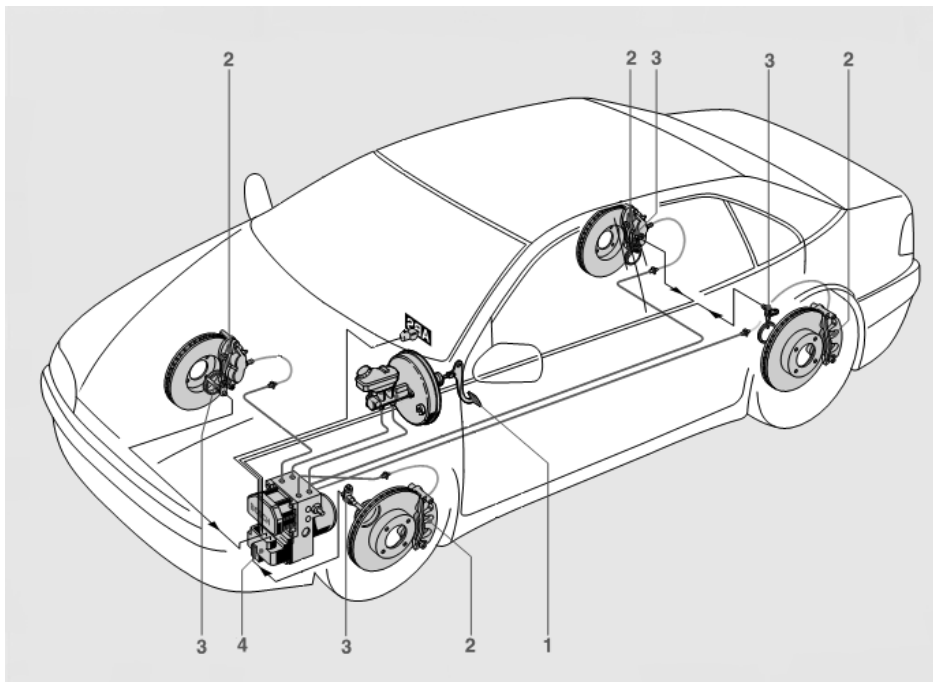
dieses KSpK kommt die Magnetfeld-Simulations-Software CST EM Studio (CST) zum Einsatz. Die Software berechnet mittels der Finiten Elemente Methode (FEM) das statische Magnetfeld des KSpK-Modells. Dies wird in Kapitel 3 vorgestellt. Bevor der zweite Schritt, die Charakterisierung des Systems, durchgeführt werden kann, müssen die Einzelkomponenten des Sensor-Encoderrad-Systems modelliert werden. Verwendet werden Encoderräder des Golf 4 und Golf 5 sowie das Encoderrad der BMW 3er Reihe, da diese durch Ivanov [16] vermessen wurden und die Messergebnisse somit zur Verfügung stehen. Dies ist nötig, um eine Vergleichbarkeit zwischen einem Syntheseergebnis und einer Messung herstellen zu können. Die Modellerstellung in CST setzt die Bestimmung der Eigenschaften der Systemelemente voraus. Dazu gehören sowohl geometrische als auch magnetische Eigenschaften. Die Vermessung dieser Komponenten wird in Kapitel 4 beschrieben. Im darauf folgenden Kapitel 5 werden die gewonnenen Daten dazu verwendet, um zunächst die Einzelkomponenten und danach das gesamte System als Modell in CST zu erstellen. Hier werden auch die für die Simulation wichtigen Einstellungen beschrieben. Nun folgt der dritte Schritt, die Synthese des Sensorausgangssignals. Dieser und ein Konzept zur Darstellung der Syntheseergebnisse werden in Kapitel 6 vorgestellt. Dabei werden Synthese- und Messergebnisse miteinander verglichen. Schließlich folgt in Kapitel 7 die Auswertung dieser Ergebnisse anhand einiger typischer Beispiele. Die Arbeit endet mit einem Fazit und einem Ausblick.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel sollen zunächst die Grundlagen aufgezeigt werden, die benötigt werden, um die Funktionsweise des für die vorliegende Arbeit verwendeten ABS-Sensors zu verdeutlichen. Als erstes wird das ABS kurz vorgestellt. Danach werden grundlegende Begriffe den Magnetismus betreffend eingeführt. Darauf folgend wird der AMR-Effekt, der grundsätzliche Aufbau eines AMR-Sensors sowie der verwendete ABS-Sensor selbst beschrieben.

### 2.1 Das Antiblockiersystem

In nahezu jedem modernen PKW wird heute zur Erhöhung der Sicherheit das ABS verwendet. Das Wirkungsprinzip beruht darauf, dass bei einem Bremsvorgang das Blockieren der Räder verhindert wird, um dadurch zum einen zu gewährleisten, dass der Fahrer weiter in der Lage ist, zu lenken, und zum anderen soll hiermit die Bremswirkung bei dem Bremsvorgang erhöht werden. Eine typische Bremsanlage mit ABS kann wie in Bild 2.1 dargestellt aussehen.



2.1 Systembild einer Bremsanlage mit Antiblockiersystem nach [1]

Das Bremspedal (1) dient dem Fahrer dazu, den Bremsvorgang zu steuern. Die Radbremse mit Radzylinder (2) überträgt die Bremskraft auf die Räder. An jeder Achse sind zur Erfassung der Raddrehgeschwindigkeiten Raddrehzahlsensoren (3) angebracht. Das ABS-Steuergerät (4) erfasst die einzelnen Raddrehzahlen, wertet diese aus, indem zum Beispiel der Schlupf zwischen Rad und Fahrbahn berechnet wird, und wirkt dann entsprechend auf die Radbremsen. Nach [1] muss das ABS mehreren Anforderungen genügen (Auszug):

#### 1. Fahrstabilität und Lenkbarkeit

- Die Stabilität der Lenkbarkeit soll unabhängig von der Fahrbahnbeschaffenheit jederzeit sichergestellt sein.
- Die Haftreibungszahl zwischen Rädern und Fahrbahn soll maximal ausgenutzt werden. Dabei hat die Stabilität und Lenkbarkeit eine höhere Priorität als eine Verkürzung des Bremsweges.
- Die Regelung der Bremsen muss sich verändernden Fahrbahnuntergründen schnell anpassen können. Zudem muss berücksichtigt werden, dass eine unterschiedliche Fahrbahnbeschaffenheit auf die Räder wirken kann. So muss beispielsweise ein Aquaplaning erkannt und diesem entgegengewirkt werden.

#### 2. Regelbereich

- Geregeltes Bremsen muss in allen möglichen Geschwindigkeiten, die ein Fahrzeug annehmen kann, gewährleistet sein, wobei eine untere Grenze von 2,5 km/h gilt, unterhalb welcher ein Blockieren der Räder unkritisch ist.

#### 3. Zeitverhalten

- Eine Anpassung an die so genannte Bremshysterese, die das Nachbremsen nach dem Lösen der Radbremse und Einflüsse wie einen eingekuppelten Motor beschreibt, muss so schnell wie möglich vorgenommen werden.
- Das Aufschaukeln des Fahrzeuges muss vermieden werden.

#### 4. Zuverlässigkeit

- Durch eine Überwachungsschaltung muss ständig überprüft werden, ob das ABS einwandfrei arbeitet. Sollte ein Fehler auftreten, der das Verhalten des Bremssystems negativ beeinflusst, muss das ABS abgeschaltet und dem Fahrer diese Abschaltung mittels geeigneter Anzeige signalisiert werden.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich umfassend mit den in Bild 2.1 mit der Ziffer 3 beschrifteten Raddrehzahlsensoren.

## 2.2 Magnetismus

Wie bereits erwähnt beruht das Sensorprinzip auf dem so genannten AMR-Effekt. Da es sich hierbei um einen magnetischen Effekt handelt, sollen in diesem Kapitel die wichtigsten Grundlagen des Magnetismus erläutert werden, um Grundbegriffe die im späteren Verlauf der vorliegenden Arbeit benötigt werden, zu erläutern. Dazu gehören unter anderem die SI-Einheit Tesla, aber auch der Begriff der Permeabilität. Sämtliche Ausführungen beziehen sich so weit nicht anders angegeben auf [2].

### 2.2.1 Ursachen des Magnetismus

Allgemein bekannt ist, dass das Magnetfeld  $\mathbf{B}$  anhand der Kraft definiert ist, die auf eine bewegte Ladung ausgeübt wird [2][3].

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

Vektorielle Größen werden stets fett gedruckt, Skalare hingegen nicht. Auch bekannt ist, dass hieraus die Rechte-Hand-Regel resultiert, mit der man die Richtung eines Magnetfeldes bestimmen kann. Die SI-Einheit Tesla für das Magnetfeld  $\mathbf{B}$  setzt sich aus

$$1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad (2.2)$$

zusammen. Nach [2] kann gezeigt werden, dass eine bewegte Punktladung ein Magnetfeld

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (2.3)$$

mit dem Einheitsvektor  $\hat{\mathbf{r}}$ , der von der Ladung weg zeigt, und der magnetischen Feldkonstante oder auch Permeabilität des Vakuums

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \quad (2.4)$$

erzeugt. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass bewegte Ladungen ein Magnetfeld erzeugen. Entsprechend des Bohr'schen Atommodells setzt sich ein Atom immer aus

einem positiv geladenen Atomkern und negativ geladenen Elektronen zusammen. Wie sich ein Elektron um einen Atomkern bewegt, muss korrekterweise mit quantenmechanischen Phänomenen erklärt werden. Um eine einfache Vorstellung von den Vorgängen in einem Atom zu bekommen, kann aber gedanklich bei dem Bohr'schen Atommodell geblieben werden. In diesem Modell kreisen die Elektronen auf Schalen um den Atomkern. Nach [2] können magnetische Momente von Atomen klassisch hergeleitet werden. Betrachtet wird ein Teilchen mit der Masse  $m$  und der Ladung  $q$ , welches sich auf einer Kreisbahn mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt. Jetzt kann der Bahndrehimpuls des Teilchens mit

$$L = m \cdot v \cdot r \quad (2.5)$$

berechnet werden. Außerdem kann das magnetische Moment  $\mu$  bestimmt werden. Dieses ergibt sich entsprechend folgender Gleichung aus dem Strom und der Fläche des Kreises, die die Kreisbahn aufspannt.

$$\begin{aligned} \mu &= I \cdot A \\ &= I \cdot \pi \cdot r^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Die Ladung bewegt sich in der Zeit  $T$  einmal um die Kreisbahn herum. Betrachtet man einen festen Punkt auf diesem Kreis, dann ist der Strom die Ladung, die diesen Punkt in einer bestimmten Zeiteinheit  $q/T$  passiert. Auf Grund dessen, dass

$$T = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (2.7)$$

gilt für den Strom

$$\begin{aligned} I &= \frac{q}{T} \\ &= \frac{q \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot r}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Setzt man Gl. (2.8) in Gl. (2.6) ein, dann ergibt sich für das magnetische Moment



$$\begin{aligned}\mu &= \frac{qv}{2\pi r} \cdot \pi r^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot qvr .\end{aligned}\tag{2.9}$$

Mit der Beziehung  $vr = L/m$  aus Gl. (2.5) ergibt sich schließlich

$$\mu = \frac{q}{2m} L .\tag{2.10}$$

Wenn die Ladung positiv ist, kann Gl. (2.10) mit vektoriellen Größen geschrieben werden, weil der Drehimpuls und das magnetische Moment in dieselbe Richtung zeigen.

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{q}{2m} \mathbf{L}\tag{2.11}$$

Dies ist die klassische Beziehung zwischen dem magnetischen Moment und dem Bahndrehimpuls, die auch für die Quantentheorie gilt. Allerdings ist das magnetische Moment des Elektronenspins in der Quantentheorie rund doppelt (genau 2,00232-mal) so groß wie in Gl. (2.11) angegeben. Da in der Quantentheorie der Bahndrehimpuls nur bestimmte Werte annehmen kann, kann also auch das magnetische Moment nur entsprechende Werte annehmen. Der Bahndrehimpuls entspricht immer ganzzahligen Vielfachen von  $\hbar = h/2\pi$ , wobei  $h$  die Planck'sche Konstante ist. Somit kann das magnetische Moment mit Hilfe von  $L/\hbar$  umgeschrieben werden zu

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{q\hbar}{2m} \frac{\mathbf{L}}{\hbar} .\tag{2.12}$$

Wird nun für  $m$  die Masse  $m_e$  und für  $q$  die Ladung  $-e$  eines Elektrons eingesetzt ergibt sich für das magnetische Moment des Elektrons

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\mu}_L &= \frac{e\hbar}{2m_e} \frac{\mathbf{L}}{\hbar} \\ &= -\mu_{Bohr} \frac{\mathbf{L}}{\hbar} .\end{aligned}\tag{2.13}$$

Das magnetische Moment eines Elektrons wird Bohr'sches Magneton  $\mu_{Bohr}$  genannt und berechnet sich durch

$$\begin{aligned}\mu_{Bohr} &= \frac{e\hbar}{2m_e} \\ &= 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2.\end{aligned}\quad (2.14)$$

Außerdem ist das durch den Spindrehimpuls  $\mathbf{S}$  erzeugte magnetische Moment mit

$$\begin{aligned}\mu_S &= -2 \frac{e\hbar}{2m_e} \frac{\mathbf{S}}{\hbar} \\ &= -2\mu_{Bohr} \frac{\mathbf{S}}{\hbar}\end{aligned}\quad (2.15)$$

angegeben. Somit wurde gezeigt, dass jedes Atom auf Grund der Elektronenbewegung ein magnetisches Dipolmoment besitzt und dass mit dem Spin der Elektronen ein weiteres magnetisches Moment verbunden ist. Im Unterschied zu einem elektrischen Dipol richtet sich der magnetische Dipol parallel zu einem von außen angelegten Feld aus. Dies bedeutet, dass das äußere Feld verstärkt wird.

### 2.2.2 Magnetismus in Materie

Nicht jedes Material verhält sich in einem angelegten Magnetfeld gleich. Der Grund für diese Unterschiede ist auf unterschiedliche Reaktionen der magnetischen Momente in diesem Feld zurückzuführen. Alle Materialien lassen sich in eine der drei Kategorien

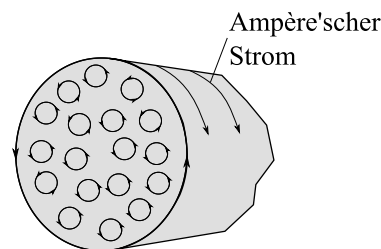
1. paramagnetische,
2. ferromagnetische und
3. diamagnetische

Stoffe einteilen [2][3][4]. Paramagnetismus bedeutet, dass unter Vorhandensein eines von außen einwirkenden Magnetfeldes die magnetischen Momente von Atomen und Molekülen ausgerichtet werden. Bei Metallen hingegen richtet sich nur ein Teil der Elektronenspins aus. Durch diese Ausrichtung verstärkt sich das Feld leicht. Allerdings richten sich bei Zimmertemperatur nur wenige der Dipole aus, weil die thermische Bewegung der Atome diesem Effekt entgegenwirkt. Ddaraus ist die auftretende Verstärkung des Feldes sehr gering. Sofern kein Feld einwirkt, sind die Wechselwirkungen der magnetischen Dipole nur gering ausgebildet und die Dipolmomente zeigen in zufällige Richtungen im Material. Bei ferromagnetischen Stoffen besteht eine starke Wechselwirkung zwischen den magnetischen Dipolen. Diese richten sich auch bei kleinen angelegten Feldern schon sehr stark aus. Es kann sogar vorkommen, dass die Dipole auch ohne vorhandenes äußeres Feld ausgerichtet sind. Dann spricht man von einem Permanentmagneten. Dies wird später näher ausgeführt.

Bei Diamagneten werden durch äußere Felder magnetische Dipole induziert. Diese Dipole richten sich entgegen dem Feld aus und schwächen es ab. Wird ein beliebiges Material in ein sehr starkes Magnetfeld gebracht, so werden die magnetischen Momente innerhalb dieses Materials wie beschrieben ausgerichtet. Diese Ausrichtung wird als Magnetisierung bezeichnet und ist definiert als das magnetische Moment je Volumeneinheit

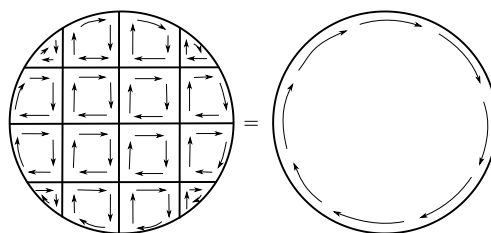
$$\mathbf{M} = \frac{d\boldsymbol{\mu}}{dV}. \quad (2.16)$$

Die Vorstellung Ampères von der Bahnbewegung und den Elektronenspins als kleine Kreisströme wird durch das in Bild 2.2 dargestellte Modell visualisiert.



2.2: Modell atomarer Kreisströme nach [2]

Dieses Modell zeigt einen magnetisierten Zylinder, in dem die magnetischen Momente der atomaren Kreisströme parallel zur Zylinderachse ausgerichtet sind. Wenn der Zylinder homogen magnetisiert wird, heben sich die benachbarten Kreisströme auf. Dadurch ist im Inneren des Körpers der Strom an jedem Punkt gleich Null. Im Gegensatz dazu ergibt sich an der Außenfläche ein Oberflächenstrom, der ungleich Null ist und Ampère'scher Strom genannt wird. Bild 2.3 zeigt diesen Umstand in vereinfachter Darstellung.



2.3: Kreisströme im Inneren und am äußeren Rand eines Zylinders nach [2]

Wird von diesem Zylinder eine Scheibe abgeschnitten, der die Dicke  $dl$ , die Querschnittsfläche  $A$  und das daraus folgende Volumen

$$dV = A \cdot dl \quad (2.17)$$

hat, ist das magnetische Dipolmoment dieser Scheibe gleich demjenigen einer Leiterschleife mit derselben Fläche  $A$ , die von einem Strom  $dI$  durchflossen wird.

$$d\mu = A \cdot dI \quad (2.18)$$

Werden Gl. (2.17) und Gl. (2.18) in Gl. (2.16) eingesetzt, erhält man für die Magnetisierung

$$\mathbf{M} = \frac{d\mu}{dV} = \frac{A \cdot dI}{A \cdot dl} \cdot \hat{\mathbf{n}} = \frac{dI}{dl} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (2.19)$$

mit dem Normalenvektor  $\hat{\mathbf{n}}$  auf der Fläche  $A$ . Die Magnetisierung ist folglich auch das Verhältnis des Ampère'schen Stroms  $I$  an der Oberfläche zu der Länge des Zylinders. Daraus ergibt sich, dass die SI-Einheit der Magnetisierung  $A/m$  lautet. Ist dieser Zylinder homogen zur seiner Achse magnetisiert, wirkt es so, als fließe an seiner Oberfläche ein Strom je Längeneinheit vom Betrag  $|\mathbf{M}|$ . Diesen Strom kann man mit dem Strom vergleichen, der durch eine dicht gewickelte Zylinderspule fließt. Für den Strom je Längeneinheit dieser Spule gilt dann  $n/l \cdot I$  mit dem Windungsstrom  $I$  und der Wicklungsdichte  $n/l$ . Das Magnetfeld innerhalb dieser Spule ist dann gegeben durch

$$\begin{aligned} B_{Spule} &= \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot I \\ &= \mu_0 \cdot \mathbf{M} . \end{aligned} \quad (2.20)$$

In das Innere dieser Spule wird nun ein Zylinder aus einem magnetischen Material eingebracht. Durch das Feld im Inneren wird dieses Material mit der Magnetisierung  $\mathbf{M}$  magnetisiert. Folglich setzt sich das Magnetfeld aus dem Feld der Spule und der Magnetisierung des Zylinders zusammen.

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{Spule} + \mu_0 \cdot \mathbf{M} \quad (2.21)$$

Wie bereits beschrieben, sind  $\mathbf{M}$  und  $\mathbf{B}_{Spule}$  bei para- und ferromagnetischen Materialien gleich und bei diamagnetischen Materialien entgegengesetzt gerichtet. Für

para- und diamagnetische Stoffe gilt weiter, dass die Magnetisierung proportional zum anliegenden, die Ausrichtung bestimmenden Feld ist. Deshalb kann für

$$\mathbf{M} = \chi_{mag} \cdot \frac{\mathbf{B}_{aus}}{\mu_0} \quad (2.22)$$

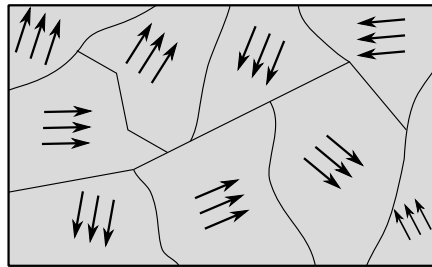
geschrieben werden. Dabei ist der Proportionalitätsfaktor  $\chi_{mag}$  die so genannte magnetische Suszeptibilität. Dementsprechend kann Gl. (2.21) umgeschrieben werden zu

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{B}_{Spule} + \mu_0 \cdot \mathbf{M} \\ &= \mathbf{B}_{Spule} \cdot (1 + \chi_{mag}) \\ &= \mu_r \cdot \mathbf{B}_{Spule} \end{aligned} \quad (2.23)$$

mit der relativen Permeabilität  $\mu_r = (1 + \chi_{mag})$  des entsprechenden Zylindermaterials. Paramagnetische Werkstoffe haben eine kleine positive magnetische Suszeptibilität, die von der Temperatur abhängig ist. Diamagnetische Materialien hingegen haben eine kleine negative und von der Temperatur unabhängige Suszeptibilität. Für ferromagnetische Stoffe besteht keine konstante Abhängigkeit zwischen dem von außen angelegten Feld und der Magnetisierung. Dieses Phänomen wird im Folgenden näher betrachtet.

### Ferromagnetismus

Metalle wie Eisen (Fe), Kobalt (Co), Nickel (Ni) und deren Legierungen untereinander sind ferromagnetisch. Wie bereits erwähnt, sind starke Wechselwirkungen zwischen den Elektronen für dieses Verhalten ursächlich. Eine Interaktion der Elektronen in einem nicht vollgefüllten Band des Metalls beziehungsweise zwischen lokalisierten Elektronen an benachbarten Atomen, welche ein magnetisches Moment besitzen, erzeugt den Ferromagnetismus. Bei diesen Materialien ist die Suszeptibilität  $\chi_{mag}$  positiv und um Größenordnungen größer als bei paramagnetischem Material. Das bedeutet, dass schon ein sehr kleines äußeres Feld zur Folge hat, dass alle atomaren Dipolmomente ausgerichtet werden. Durch die starke Wechselwirkung kommt es auch dazu, dass sich benachbarte Dipolmomente in räumlich begrenzten Bereichen auch ohne Anlegen eines Feldes aneinander ausrichten. Diese Gebiete werden Weiß'sche Bezirke genannt.

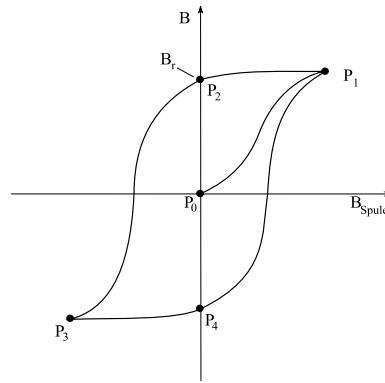


2.4: Schematische Darstellung Weiß'scher Bezirke nach [2]

Bild 2.4 zeigt wie sich die Momente ausrichten. Innerhalb eines Bezirkes zeigen alle Momente in dieselbe Richtung. Ein äußeres Feld, auch ein sehr schwaches, bewirkt, dass sich die Raumbereiche vergrößern und entlang des Feldes ausrichten. Es entsteht ein magnetisches Moment, welches von Null verschieden ist. Ein diesem Effekt entgegenwirkender Parameter ist die Temperatur. Übersteigt diese die so genannte Curie Temperatur, wirkt die thermische Bewegung der Atome der Ausrichtung entgegen. Auch nach dem Abschalten eines äußeren Feldes lösen sich diese so genannten Domänen nicht vollständig auf, sondern bleiben teilweise erhalten. Folgendes Beispiel nach [2] soll verdeutlichen, was bei zunehmender Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials passiert: Man stelle sich einen Stab aus dem genannten Material vor, welcher erneut in eine Zylinderspule gebracht wird. Die magnetischen Momente der Spule  $\mathbf{B}_{\text{Spule}}$  und des Materials  $\mathbf{M}$  zeigen in dieselbe Richtung. Unter Anwendung von Gl. (2.23) gilt

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{B}_{\text{Spule}} + \mathbf{B}_{\text{Material}} \\ &= \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot \mathbf{I} + \mu_0 \cdot \mathbf{M}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Meist ist es so, dass die Magnetisierung des ferromagnetischen Materials deutlich größer ist als die des angelegten, die Magnetisierung erzeugenden Feldes. Bild 2.5 zeigt das Verhalten der Magnetisierung des ferromagnetischen Stabs als Funktion des Feldes der Zylinderspule. In Punkt  $P_0$  beginnt die Kurve. Zunächst steigt der Strom innerhalb der Spule und für die Magnetisierung ergibt sich der zwischen  $P_0$  und  $P_1$  dargestellte Teil der Kurve, der Neukurve genannt wird. Ein weiter steigender Spulenstrom bewirkt eine Abflachung der Kurve je mehr sich der Verlauf dem Punkt  $P_1$  nähert. Dieses Verhalten ist der Ausrichtung der magnetischen Momente aller Atome des Metallstabs verschuldet. Das magnetische Moment pro Volumeneinheit ist gleich der Anzahl der Moleküle pro Volumeneinheit multipliziert mit dem magnetischen Moment eines einzelnen Moleküls. Für diesen Fall wird von der Sättigungsmagnetisierung  $M_S$  gesprochen.



2.5: Magnetisierung des ferromagnetischen Stabs als Funktion des äußeren Feldes der Spule nach [2]

$$\mathbf{M}_S = \frac{n}{V} \cdot \boldsymbol{\mu} \quad (2.25)$$

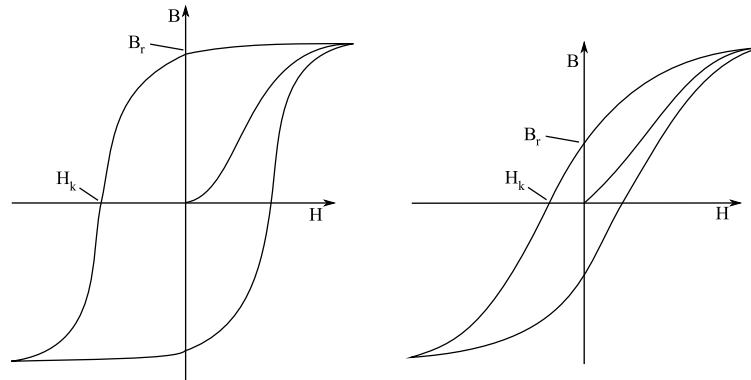
Wird, nachdem der Punkt  $P_1$  erreicht wurde, der Spulenstrom reduziert, verringert sich das Magnetfeld nicht entsprechend der Neukurve, da die Weiß'schen Bezirke ausgerichtet bleiben. Selbst wenn der Spulenstrom in Punkt  $P_2$  Null ist, bleibt eine Magnetisierung erhalten, die so genannte Remanenz  $B_r$ . Diesen Effekt nennt man Hysterese, auf Grund dessen die in Bild 2.5 gezeigte Kurve Hysteresekurve heißt. Bleibt eine dauerhafte Magnetisierung erhalten, wird der ferromagnetische Stab in der Spule zu einem Permanentmagneten. Wird nun der Spulenstrom entgegengesetzt eingespeist, nimmt das Magnetfeld anhand der Kurve von  $P_2$  nach  $P_3$  weiter ab. In  $P_3$  ist wieder der Zustand der Sättigung gegeben. Der Strom wird nach Erreichen dieses Punktes erneut umgepolt. In Punkt  $P_4$  hat der Permanentmagnet seine Polung gedreht. Das Verhalten eines solchen Materials in einem Magnetfeld hängt also von seiner Vorgeschichte ab. Betrachtet man nur die Neukurve zwischen  $P_1$  und  $P_2$ , gilt wie bereits gezeigt, dass äußeres Feld und Magnetisierung parallel sind. Die magnetische Suszeptibilität kann nach Gl. (2.22) bestimmt werden. Außerdem gilt nach Gl. (2.23)

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{B}_{Spule} \cdot \mu_r \\ &= \mu_0 \cdot n \cdot \mathbf{I} \cdot \mu_r \\ &= \mu \cdot n \cdot \mathbf{I} \end{aligned} \quad (2.26)$$

mit der Permeabilität des Materials

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (2.27)$$

Wie in Bild 2.5 zu erkennen ist, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen dem von außen angelegten Feld und der Magnetisierung des ferromagnetischen Stoffs. Hieran wird deutlich, dass  $\mu_r$  bei ferromagnetischen Stoffen keine Konstante ist. Die Energie, die bei einer Ummagnetisierung aufgewendet werden muss, ist proportional zu der Fläche, die die Hysteresekurve umschließt. Man teilt ferromagnetische Stoffe grob in die zwei Kategorien hartmagnetisch und weichmagnetisch ein. Bild 2.6 zeigt zwei verschiedene Hysteresekurven.



2.6: Magnetische Eigenschaften ferromagnetischer Stoffe nach [4]

Im Unterschied zu der in Bild 2.5 ersten gezeigten Hysteresekurve ist hier auf der Abszisse die magnetische Feldstärke  $H$  abgetragen. Der Zusammenhang zwischen dem Magnetfeld und der magnetischen Feldstärke ist

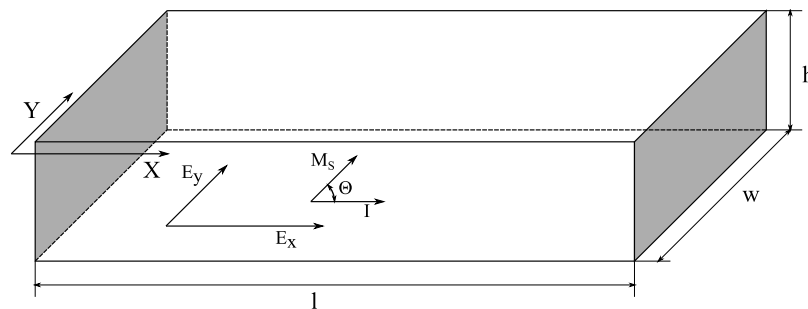
$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \cdot \mathbf{H} \\ &= \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} . \end{aligned} \quad (2.28)$$

Auch hier ist jeweils wieder die Remanenz  $B_r$  an die Ordinate geschrieben. Zusätzlich ist die so genannte Koerzitivfeldstärke  $H_k$  eingezeichnet. Dies ist die Feldstärke, bei der die Magnetisierung wieder Null und das Material kein Permanentmagnet mehr ist. Zu erkennen ist, dass sowohl die Koerzitivfeldstärke als auch die Remanenz im rechten Graphen höher sind als im linken. Rechts spricht man von einem hartmagnetischen und links von einem weichmagnetischen Material. Ein weichmagnetischer Stoff lässt sich leichter ummagnetisieren als ein hartmagnetischer. Trafobleche müssen demnach aus einem sehr weichmagnetischen, Permanentmagneten aus einem sehr hartmagnetischen Stoff beschaffen sein.



### 2.3 Der anisotrope magnetoresistive Effekt

Grundsätzlich beschreibt der AMR-Effekt die Widerstandsänderung eines Materials, wenn von außen ein Feld an dieses gelegt wird. Wie dies geschieht, soll nun näher beschrieben werden. Sämtliche Ausführungen beziehen sich so weit nicht anders angegeben auf [6]. Zunächst soll ein Werkstoffstreifen, welcher in der Richtung  $M_S$  magnetisiert ist und eine Höhe  $h$  sowie eine rechteckige Seitenfläche mit der Breite  $w$  und der Länge  $l$  hat, betrachtet werden [5].



2.7: Prinzip des AMR-Effekts nach [5]

An die in Bild 2.7 erkennbaren grauen Seitenflächen dieses Streifens wird nun eine Spannung angelegt, wodurch sich in diesem ein elektrisches Feld  $\vec{E}_x$  ausbildet. Die Stromrichtung und die interne Magnetisierung schließen den Winkel  $\Theta$  ein. Wenn ein externes Magnetfeld auf diesen Streifen in Richtung  $\vec{E}_y$  wirkt, dreht sich die interne Magnetisierung entsprechend (vgl. Kapitel 2.2.2). Demzufolge ändert sich auch der spezifische Widerstand des Materials, welcher sich aus

$$\begin{aligned}\rho(\Theta) &= \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \Theta \\ &= \rho_{\perp} + \Delta\rho \cdot \cos^2 \Theta\end{aligned}\quad (2.29)$$

zusammensetzt. Der Quotient  $\Delta\rho/\rho$  wird der magnetoresistive Effekt genannt. Auf Grund dessen, dass das Sensorprinzip auf der Messung der Änderung des Widerstandes beruht, soll nun dieser anstatt des spezifischen Widerstandes betrachtet werden. Der Widerstand eines Metallstreifens, wie er in Bild 2.7 abgebildet ist, beträgt  $R = \rho \cdot l/A$  mit  $A = w \cdot h$ . Also ergibt sich

$$\begin{aligned}R(\Theta) &= \rho_{\perp} \cdot \frac{l}{w \cdot h} + \Delta\rho \cdot \frac{l}{w \cdot h} \cdot \cos^2 \Theta \\ &= R + \Delta R \cdot \cos^2 \Theta.\end{aligned}\quad (2.30)$$

Daraufhin kann der Spannungsabfall in X-Richtung mit

$$U_x = R \cdot I + \Delta R \cdot I \cdot \cos^2 \Theta \quad (2.31)$$

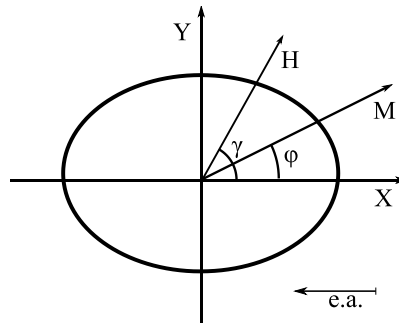
berechnet werden. Der spezifische Widerstand ist keine skalare Größe. Aus diesem Grund ruft er ein Feld  $E_y$  hervor, welches senkrecht zu der Stromdichte  $j_x$  ist, die vom Feld  $E_x$  verursacht wird. Somit ergibt sich für dieses Feld

$$E_y = j_x \cdot \Delta \rho \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta . \quad (2.32)$$

Diese Erscheinung wird planarer Hall-Effekt genannt, weil er dem gewöhnlichen Hall-Effekt ähnelt. Damit kann der Spannungsabfall in Y-Richtung mit

$$U_y = j_x \cdot w \cdot \Delta \rho \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \quad (2.33)$$

bestimmt werden. Hierbei ist  $w$  die Breite des Metallstreifens. Stellt man die beiden Spannungen  $U_x$  und  $U_y$  gegenüber, kann festgestellt werden, dass  $U_x$  auf Grund des  $\cos^2 \Theta$ -Terms nicht vom Vorzeichen von  $\Theta$  abhängt,  $U_y$  hingegen schon. Der ABS-Sensor ist ein integriertes Bauelement, bei dem ein dünner Film eines magnetischen Materials auf ein Trägermaterial wie Silizium aufgebracht wird. Neben einer Magnetisierung in Filmebene gibt es noch weitere Magnetisierungsrichtungen, die hier aber nicht näher betrachtet werden sollen. Zu beachten ist, dass die Domänenlängen beziehungsweise die Weiß'schen Bezirke (vgl. Bild 2.4) groß gegenüber der Dicke der dünnen Schicht sind. Im Folgenden soll eine solche Domäne betrachtet werden. Einen Anteil an der Ausrichtung hat die Kristallanisotropie. Diese wird dadurch hervorgerufen, dass die Weiß'schen Bezirke in einer gewissen Ausprägung erhalten bleiben. Bei einem polykristallinen Material können diese Domänen in eine beliebige Richtung zeigen; bei einem monokristallinen Material gibt es hingegen eine Vorzugsrichtung. Diese Richtung wird im Fall der einzelnen Domäne easy axis genannt. Der zweite Anteil an der Ausrichtung ist durch die Formanisotropie geprägt, welche durch demagnetisierende Felder hervorgerufen wird. Einen weiteren Anteil können mechanische Kräfte haben, die hier aber vernachlässigt werden.



2.8: Geometrie eines dünnen Films mit seiner Magnetisierung nach [6]

Die Stoner-Wohlfarth-Theorie beschreibt die bereits erwähnte Änderung der Magnetisierungsrichtung unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes. Dabei wird die Energiedichte als Funktion des Winkels  $\varphi$  zwischen der Magnetisierungsrichtung  $\mathbf{M}$  und der easy axis betrachtet. Hierfür wird der in Bild 2.8 gezeigte elliptische Film angenommen. Die Energiedichte  $u$  setzt sich aus den folgenden drei Termen zusammen:

1. Feldenergiedichte

$$u_H = -\mathbf{H} \cdot \mathbf{M} \cdot \cos(\gamma - \varphi) \quad (2.34)$$

2. Anisotropieenergiedichte

$$u_k = k \cdot \sin^2(\varphi) \quad (2.35)$$

Da es nur eine easy axis gibt, enthält dieser Term nur einen Anteil. Das  $k$  ist eine Materialkonstante.

3. Demagnetisierungsenergiedichte

Das in Ellipsen homogene Demagnetisierungsfeld  $\mathbf{H}_d$  beschreibt die an den Enden entstehenden freien Pole und kann zur Bestimmung von  $u_d$  genutzt werden.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{d,x} &= -N_x \cdot \mathbf{M}_x \\ &= -N_x \cdot \mathbf{M} \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{d,y} &= -N_y \cdot \mathbf{M}_y \\ &= -N_y \cdot \mathbf{M} \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (2.37)$$

$N_x$ ,  $N_y$  und  $N_z$  sind Demagnetisierungsfaktoren, die zu der jeweiligen Achse gehören. Außerdem gilt  $N_x + N_y + N_z = 1$ . Beide Felder tragen zu der Demagnetisierungsenergiedichte

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{1}{2} N_x \cdot \mathbf{M}^2 \cdot \cos^2(\varphi) + \frac{1}{2} N_y \cdot \mathbf{M}^2 \cdot \sin^2(\varphi) \\ &= \frac{1}{2} N \cdot \mathbf{M} \cdot \sin^2(\varphi) + \frac{1}{2} N_x \cdot \mathbf{M}^2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

mit  $N = N_y - N_x$  bei.

Die Summe dieser Terme ergibt die Gesamtenergiedichte

$$u = k \cdot \sin^2 \varphi + \frac{1}{2} N \cdot \mathbf{M} \cdot \sin^2 \varphi + \frac{1}{2} N_x \cdot \mathbf{M}^2 - \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} \cdot \cos(\gamma - \varphi). \quad (2.39)$$

Häufig wird die Anisotropie jedoch nicht durch die Materialkonstante  $k$ , sondern durch das Anisotropiefeld

$$\mathbf{H}_k = \frac{2 \cdot k}{\mathbf{M}} \quad (2.40)$$

ausgedrückt. Dieses Feld kann nun dazu genutzt werden, um das charakteristische Feld  $\mathbf{H}_0$  zu berechnen. Dazu muss  $\mathbf{H}_k$  mit  $\mathbf{H}_d = -N \cdot \mathbf{M}$  kombiniert werden. Damit ergibt sich

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_0 &= \mathbf{H}_k - N \cdot \mathbf{M} \\ &= \mathbf{H}_k + \mathbf{H}_d. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Werden Gl. (2.40) und Gl. (2.41) in Gl. (2.39) eingesetzt, erhält man

$$u = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{M} \cdot \sin^2 \varphi - \mathbf{H} \cdot \mathbf{M} \cdot \cos(\gamma - \varphi) + \frac{1}{2} N_x \cdot \mathbf{M}. \quad (2.42)$$

Der Winkel  $\varphi$ , der angibt, in welche Richtung  $\mathbf{M}$  die geringste Energie  $u$  hat, kann durch Ableiten von Gl. (2.42) nach  $\varphi$  und anschließendes Nullsetzen bestimmt werden.

$$\begin{aligned}\sin \varphi &= \frac{\mathbf{H} \cdot \sin \gamma}{\mathbf{H}_0 + \mathbf{H} \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos \varphi}} \\ &= \frac{\mathbf{H}_y}{\mathbf{H}_0 + \frac{\mathbf{H}_x}{\cos \varphi}}\end{aligned}\quad (2.43)$$

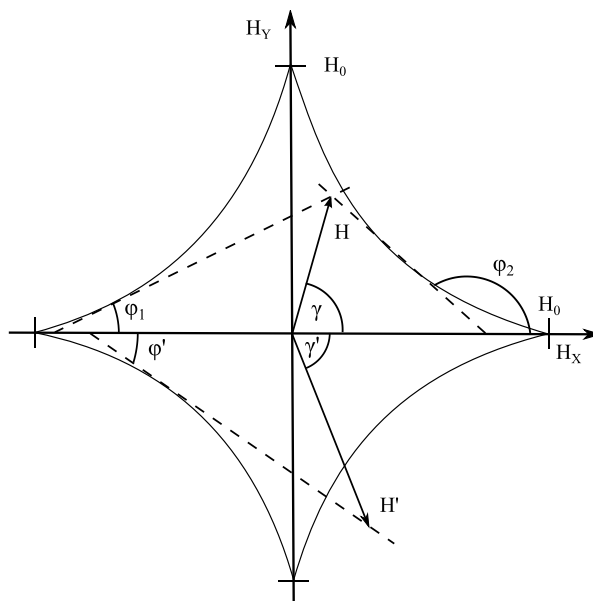
Gl. (2.43) ist gültig für  $-1 \leq \sin \varphi \leq 1$ , sonst gilt  $\sin \varphi = \pm 1$ . Wird an die Domäne ein äußeres Feld angelegt, welches nur in Richtung der Y-Achse zeigt ( $\mathbf{H}_x = \mathbf{0}$ ) und vom Betrag größer als die charakteristische Magnetisierung, wird  $\mathbf{M}$  um  $+90^\circ$  oder  $-90^\circ$  gedreht. Ist das angelegte Feld kleiner, ist auch der Drehwinkel kleiner. Hat das angelegte Feld zusätzlich eine Komponente in X-Richtung ( $H_x \neq 0$ ) und ist  $|\varphi| \leq 30^\circ$ , kann der Faktor  $1/\cos \varphi$  als 1 angenommen werden. Dadurch addiert sich das Feld  $\mathbf{H}_x$  zu dem Feld  $\mathbf{H}_0$  (vgl. Gl. (2.43) zweiter Teil). Sollte  $\mathbf{H}_x$  sehr groß gegenüber  $\mathbf{H}_0$  sein, kann Gl. (2.43) weiter vereinfacht werden zu

$$\begin{aligned}\tan \varphi &= \frac{\mathbf{H}_y}{\mathbf{H}_x} \\ &= \tan \gamma.\end{aligned}\quad (2.44)$$

Der ABS-Sensor misst nur das Feld in Y-Richtung und nicht den Betrag. Damit eindeutige Ergebnisse für eine Feldmessung erzielt werden können, wird die maximale Drehung der Magnetisierung auf  $\pm 90^\circ$  beschränkt. Nun setzt man  $\Theta = \varphi - \psi$  mit  $\psi$  dem Winkel der Stromrichtung. Bisher wurde davon ausgegangen, dass das Ergebnis von Gl. (2.43) das Minimum ist. Dies kann durch erneutes Ableiten nach  $\varphi$  kontrolliert werden. Nach der Stoner-Wohlfarth-Theorie kann man Gebiete, in denen die zweite Ableitung verschwindet, von den Gebieten unterscheiden, in denen die Gesamtenergiedichte minimal beziehungsweise maximal wird. Werden beide Ableitungen Null gesetzt und  $\varphi$  eliminiert, dann folgt

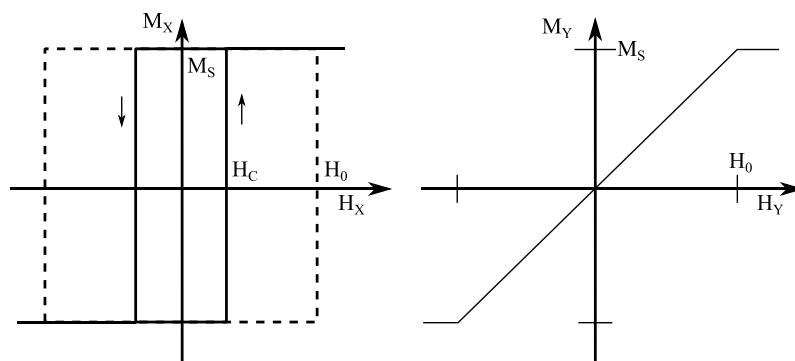
$$\mathbf{H}_0^{2/3} = |\mathbf{H}_x|^{2/3} + |\mathbf{H}_y|^{2/3}.\quad (2.45)$$

Gl. (2.45) beschreibt den so genannten Stoner-Wohlfarth-Astroid, der in Bild 2.9 gezeigt wird.



2.9: Stoner-Wohlfarth-Astroid nach [6]

Mit diesem Astroiden können Lösungen für  $\varphi$  gefunden werden. Eingezeichnet sind das externe Feld  $\mathbf{H}$  sowie die mit gestrichelten Linien gekennzeichneten Tangenten an dem Astroiden, die die Spitze des Vektors berühren. Liegt der Betrag von  $\mathbf{H}$  innerhalb des Astroiden, gibt es für  $\varphi$  zwei Lösungen und dementsprechend auch zwei mögliche Magnetisierungslagen. Diese sind als  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  in die obere Hälfte eingezeichnet. Befindet sich das externe Feld betraglich außerhalb des Astroiden, gibt es nur eine Möglichkeit, eine Tangente anzulegen, und somit auch nur eine Magnetisierungsrichtung. Ein solcher Fall ist beispielhaft mit  $\mathbf{H}'$  und  $\varphi'$  in die untere Hälfte eingezeichnet. Für den ersten Fall haben die beiden Lösungen für die Magnetisierungsrichtung verschiedene Vorzeichen, wenn die X-Komponenten betrachtet werden. Verstärkt man das Feld  $\mathbf{H}$ , sodass es den Astroiden verlässt, klappt die Magnetisierung um. Dieses Verhalten kann mittels der in Bild 2.10 gezeigten Hysteresekurven veranschaulicht werden.



2.10: Hysteresekurven der Magnetisierungen parallel zur easy axis ( $H_x$ ) und hard axis ( $H_y$ ) [6]

Entlang der easy axis stellen sich nur die zwei stabilen Werte der Magnetisierung  $\mathbf{M} = \pm \mathbf{M}_s$  ein. Theoretisch sollte  $\mathbf{M}_s$  erst bei der charakteristischen Feldstärke  $\mathbf{H}_0$  umklappen, dargestellt durch die gestrichelte Linie im linken Teil des Bildes. Bei Messungen wurde aber festgestellt, dass das Umschalten bereits bei der Koerzitivfeldstärke stattfindet, gekennzeichnet durch die durchgezogene Hysteresekurve links. Das Verhältnis zwischen  $\mathbf{H}_0$  und  $\mathbf{H}_c$  hängt von der Güte der dünnen, magnetisierten Schicht ab. Wird das Verhalten bei Anlegen eines externen Feldes  $\mathbf{H}_y$  parallel zu der so genannten hard axis (rechts im Bild) betrachtet, ist festzustellen, dass sich die Magnetisierung linear ändert, solange  $|\mathbf{H}| \leq \mathbf{H}_0$  (bzw.  $\mathbf{H}_k$ ), ansonsten gilt  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_s$ . Dieses Verhalten wurde durch Experimente bestätigt. Auf diese Weise kann das materialabhängige Anisotropiefeld  $\mathbf{H}_k$  ermittelt werden.

## 2.4 Grundsätzlicher Aufbau eines AMR-Sensors

Auf der bislang vorgestellten Theorie aufbauend kann nun ein AMR-Sensor entwickelt werden, der den AMR-Effekt ausnutzt. Dabei dient der in Bild 2.7 visualisierte Aufbau erneut als Grundlage. Es gilt  $l \gg w \gg h$ . Das verwendete Material kann durch  $\mathbf{H}_k$  und dessen Geometrie durch  $\mathbf{H}_d$  (vgl. Gl. (2.36) und (2.37)) beschrieben werden. Wird der elliptische Aufbau aus Bild 2.8 durch ein langes, flaches Rechteck ersetzt, kann der Demagnetisierungsfaktor durch

$$N = \frac{h}{w} \quad (2.46)$$

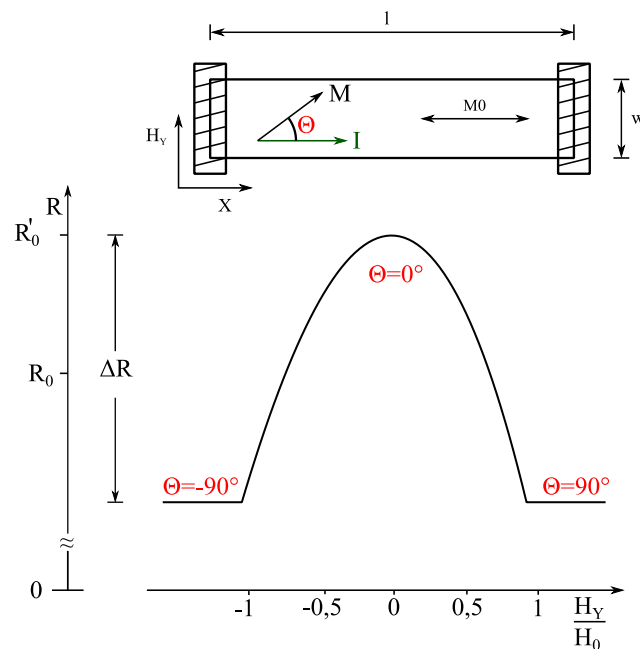
genügend genau angenähert werden. Durch die Vorgabe der geometrischen Eigenschaften kann  $N$  einfach und in einem weiten Bereich eingestellt werden. Auf Grund dessen, dass die elliptische Form nur eine Annäherung an die tatsächliche Form ist, gibt es Abweichungen hinsichtlich der Homogenität des Demagnetisierungsfeldes. Die Magnetisierung dreht sich in den Ecken des Streifens um einen kleineren Winkel als in der Mitte, weswegen ein Mittelwert des Winkels als Richtung angenommen wird. Mit Hilfe von Gl. (2.30) und (2.43) kann der Widerstand des Films berechnet werden. Mit  $\Theta = \varphi$  sowie der Annahme, dass  $\mathbf{H}_x = 0$  und  $R'_0 = R_\perp + \Delta R$ , ergibt sich

$$R(\mathbf{H}) = R'_0 - \Delta R \cdot \frac{H_y^2}{H_0^2}. \quad (2.47)$$

So kann auch die Spannung des planaren Hall-Effektes in Y-Richtung nach Gl. (2.33) und (2.43) bestimmt werden.

$$U_y = I \cdot \frac{l}{h} \cdot \Delta\rho \cdot \frac{H_y}{H_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{H_y^2}{H_0^2}} \quad (2.48)$$

Ist  $H_x \neq 0$  muss  $H_0$  durch  $H_0 + H_x / \cos \varphi$  ersetzt werden, weil dann der Winkel, um den sich die Magnetisierung dreht, größer als  $30^\circ$  ist und der Term  $\cos \varphi$  nicht mehr als 1 angenommen werden kann. Nachstehend zeigt Bild 2.11 die quadratische Änderung des Widerstandes, welche sich aus Gl. (2.47) ergibt.



2.11: Widerstandsänderung eines einfachen AMR-Sensors abhängig vom von außen angelegten Feld nach [5] und [6]

Für die Verwendung als Messwerkzeug ist es von Vorteil, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Ursache der Änderung (Magnetfeld von außen) und der Messgröße (Widerstand des Streifens) vorliegt. Eine Linearisierung kann durch Drehen von  $M$  oder  $I$  erreicht werden. Wie bereits gezeigt, ist es leicht, die Magnetisierung durch ein äußeres Feld, das Bias-Feld  $H_B$ , zu drehen. Zu jedem weiteren Feld in  $Y$ -Richtung kann dieses Feld dann addiert werden. So muss in Gl. (2.47)  $H_y$  durch  $H_y + H_B$  ersetzt werden. Gl. (2.49) zeigt das Ergebnis dessen.



$$R(\mathbf{H}) = R'_0 - 2 \cdot \mathbf{H}_y \cdot \frac{\mathbf{H}_B}{\mathbf{H}_0^2} - \Delta R \cdot \frac{\mathbf{H}_y^2 + \mathbf{H}_b^2}{\mathbf{H}_0^2} \quad (2.49)$$

Ist  $\mathbf{H}_y$  sehr viel kleiner als  $\mathbf{H}_0$ , ergibt sich der eben genannte lineare Zusammenhang. Zu beachten ist hierbei, dass das Bias-Feld konstant sein muss, da anhand des Sensorsignals nicht zwischen einer Variation des  $\mathbf{H}_y$ -Feldes und des Bias-Feldes unterschieden werden kann. Zudem muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Vorzeichen von  $\mathbf{H}_B$  benötigt werden, um verschiedene Steigungen einzustellen. Somit muss der zweite Ansatz, die Drehung des Stroms, weiterverfolgt werden. Dabei wird der Strom um einen Winkel  $\psi$  gegenüber der easy axis gedreht. Zunächst ist es nötig, die Theorie aus Kapitel 2.3 zu erweitern, da bisher angenommen wurde, dass die easy axis die Hauptachse des Ellipsoiden ist. Wenn nun das Sensorelement gedreht wird, bildet sich ein Winkel  $\varepsilon$  zwischen der easy axis und der Hauptachse aus. Dieses Problem kann durch das Einführen eines Koordinatensystems behoben werden, das um den Winkel  $\xi$  gegenüber dem ursprünglichen gedreht wird. Damit gilt dann

$$\tan 2\xi = \frac{\mathbf{H}_k \cdot \sin 2\varepsilon}{\mathbf{H}_d + \mathbf{H}_k \cdot \cos 2\varepsilon} \quad (2.50)$$

mit dem charakteristischen Feld

$$\mathbf{H}_o = \sqrt{\mathbf{H}_d^2 + \mathbf{H}_k^2 + 2\mathbf{H}_d \cdot \mathbf{H}_k \cdot \cos 2\varepsilon}. \quad (2.51)$$

Insgesamt gibt es drei wichtige Zustände von  $\varepsilon$ , die näher betrachtet werden sollen.

1.  $\varepsilon \ll 1$

$$\tan 2\xi < \tan 2\varepsilon, \mathbf{H}_0 \approx \mathbf{H}_d + \mathbf{H}_k \quad (2.52)$$

Dies bedeutet, dass kleine Abweichungen der easy axis vernachlässigbar sind.

2.  $\varepsilon \approx 45^\circ$

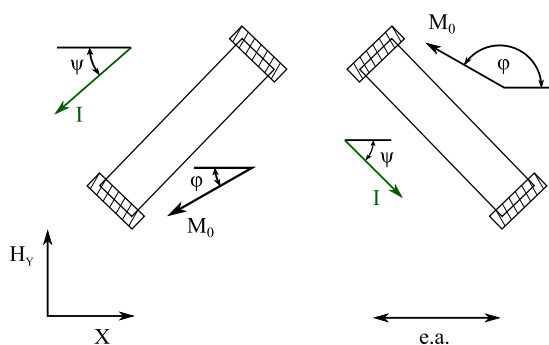
$$\tan(2\xi) \approx \frac{\mathbf{H}_k}{\mathbf{H}_d}, \mathbf{H}_0 \approx \sqrt{\mathbf{H}_d^2 + \mathbf{H}_k^2} \quad (2.53)$$

3.  $\varepsilon \approx 90^\circ$

$$|\tan(90^\circ - \varepsilon)| > \tan(90^\circ - \xi), \mathbf{H}_0 \approx |\mathbf{H}_d - \mathbf{H}_k| \quad (2.54)$$

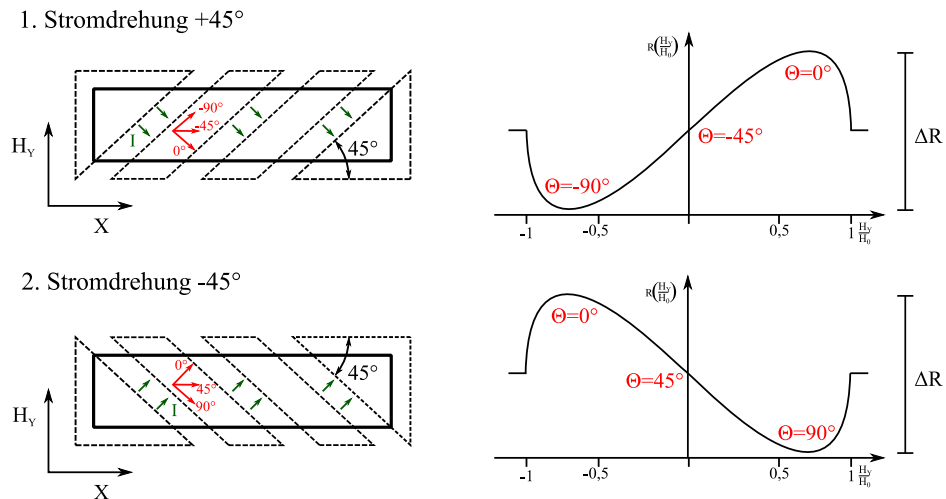
Ist die easy axis entlang der kürzeren Ellipsenachse ausgerichtet, ist das charakteristische Feld kleiner.

Diese Theorie kann im Folgenden dazu verwendet werden, ein erstes linearisiertes Sensorelement zu konstruieren. Bild 2.12 zeigt die Drehung eines Sensorelementes um die easy axis. Dabei wurde das Widerstandselement um den Winkel  $\psi$  gegenüber der easy axis geneigt.



2.12: Drehung eines Sensorelementes um die easy axis nach [6]

Zu erkennen ist, dass der Strom  $\mathbf{I}$  trotzdem entlang der Achse des Elementes fließt. Abgebildet sind beide möglichen Neigungen. Die Magnetisierung  $\mathbf{M}_0$  ist zum Teil in die Streifenachse gedreht. Damit einer der Magnetisierungszustände erzwungen wird, ist es nötig, ein stabilisierendes Feld in Richtung der easy axis anzulegen. Das resultierende Signal kann berechnet werden, indem  $\theta = \varphi - \psi$  in Gl. (2.30), (2.43) und (2.53) eingesetzt wird. Das hierbei entstehende Ergebnis ist komplexer als die bisherigen Lösungen. Eine Möglichkeit, dieser Komplexität entgegenzuwirken ist, den Winkel  $\varphi_0 - \psi = \pm 45^\circ$  zu wählen, wodurch der Term  $\sin \theta \cdot \cos \theta$  in Gl. (1.34) durch  $\sin(\varphi - \varphi_0) \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)$  ersetzt wird. Die Steigung der gewünschten  $R(\mathbf{H})$ -Kurve kann durch das Vorzeichen der Neigungsrichtung angepasst werden. Diese Richtung muss durch ein Stützfild in X-Richtung  $\mathbf{H}_x > 0$  stabilisiert werden. Wie beschrieben, soll der Strom gedreht werden. Diese Drehung kann durch Anbringen von hoch leitfähigem Material auf dem magnetisierten Film in Streifenform erfolgen. Damit gelangt man zu der so genannten Barberpole-Struktur, welche links in Bild 2.13 zu erkennen ist.



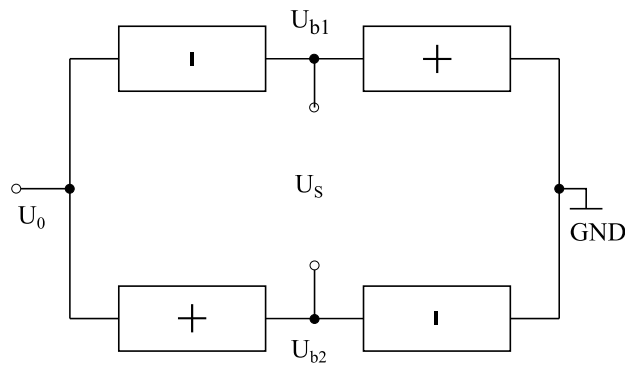
2.13: Linearisierter AMR-Sensor mit Barberpole-Struktur und dazugehöriger Widerstandsänderungs-Kennlinie nach [5] und [6]

Für den Strom bedeutet ein solcher Streifen auf dem magnetoresistiven Material einen Kurzschluss, wodurch der Strom meist senkrecht auf dem Streifen fließt. In den meisten Fällen wird der Winkel  $\psi$  wie auch hier auf  $\pm 45^\circ$  festgelegt. Damit ergibt sich für die Berechnung des Widerstandes in Abhängigkeit vom Feld

$$R(\mathbf{H}) = R_0 \pm \Delta R \cdot \frac{H_y}{H_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{H_y^2}{H_0^2}}. \quad (2.55)$$

Auf der rechten Seite des Bildes 2.13 ist das Ergebnis von Gl. (2.55) eingezeichnet. Zu erkennen ist, dass die Kennlinie in dem Bereich von  $-0,5 \cdot H_0$  bis  $+0,5 \cdot H_0$  linear ist. Diese Art Sensor funktioniert nur in einer Vorzugsrichtung, hier  $H_y$ . Wenn die Magnetisierungsrichtung geändert wird, so ändert auch ihre Steigung das Vorzeichen. Zu beachten ist, dass Widerstandselemente in Barberpole-Struktur meist einen kleinen Wert besitzen, da durch die leitfähigen Streifen der Widerstand verringert wird. Deshalb kann eine Wheatstone-Messbrücke verwendet werden, in der jeweils positive und negative Barberpole-Elemente angeordnet werden. Dieses Konzept wird in Kapitel 2.5 genauer erläutert.

Als nächstes soll die Empfindlichkeit dieses Aufbaus berechnet werden. Bild 2.14 zeigt eine Wheatstone-Messbrücke, in der mit „+“ und „-“ die Ausrichtung der Barberpole gekennzeichnet ist (vgl. Bild 2.13).



2.14: Wheatstone-Messbrücke aus Barberpole-Widerstandselementen nach [6]

Da die easy axis im Gegensatz zur hard axis weniger empfindlich ist und Felder senkrecht auf der Fläche des Widerstandselementes auf Grund starker demagnetisierender Felder kaum gemessen werden können, werden Felder in  $\mathbf{H}_y$ -Richtung gemessen. Die Empfindlichkeit ist definiert mit

$$S_0 = \frac{\Delta U_S / \Delta \mathbf{H}_y}{U_0}. \quad (2.56)$$

Somit ist die Empfindlichkeit die Änderung der Ausgangsspannung  $U_S$ , die durch eine Änderung des Feldes  $H_y$  hervorgerufen wird und die Einheit  $(mV/V)/(kA/m)$  hat. Auf Basis von Gl. (2.55) kann nun die Ausgangsspannung der Brückenschaltung mit

$$U_S = U_0 \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{H_y}{H_0 + H_x} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{H_y}{H_0 + H_x} \right)^2} \quad (2.57)$$

bestimmt werden. Ist  $H_y$  sehr viel kleiner als  $H_0 + H_x$ , ergibt sich für die Empfindlichkeit

$$S_0 = \frac{\Delta \rho / \rho}{H_0 + H_x}. \quad (2.58)$$

Dies verdeutlicht, wie wichtig das charakteristische Feld für die Empfindlichkeit ist, welche umgekehrt proportional zu diesem ist, wenn  $H_x = 0$  gilt. Zu erkennen ist, dass ein Feld in  $H_x$ -Richtung die Empfindlichkeit verringert. Außerdem ist die Empfindlichkeit direkt proportional zu dem Verhältnis  $\Delta \rho / \rho$ . Da die Kennlinie nicht über den gesamten Bereich linear ist, wird der Messbereich so definiert, dass der Fehler

durch nichtlineares Verhalten maximal 5% beträgt [6]. Daraus resultiert der Messbereich

$$\mathbf{H}_G \approx \pm 0,5 \cdot (\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_x). \quad (2.59)$$

Wird der Messbereich mit der Empfindlichkeit kombiniert, ergibt sich

$$S_0 \cdot \mathbf{H}_G \approx 0,5 \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho}. \quad (2.60)$$

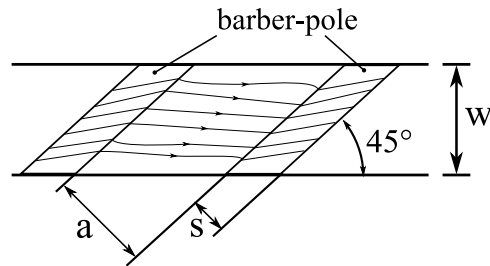
Ist das Verhältnis  $\Delta\rho/\rho$  konstant, so kann die Empfindlichkeit nur durch Verringern des linearen Bereichs der Kennlinie erhöht werden. Will man im Umkehrschluss hingegen einen größeren linearen Bereich erzielen, sinkt die Empfindlichkeit. Im Wesentlichen werden diese beiden Kenngrößen durch die geometrischen Eigenschaften der Barberpole festgelegt.

## 2.5 Der ABS Sensor

In diesem Kapitel soll detaillierter auf den Aufbau eines Barberpole-Sensors eingegangen und der Aufbau sowie die Funktionsweise der ABS-Sensoren KMI 18/2 und KMI 22/1 der Firma NXP Semiconductors GmbH erläutert werden. Grundlage des magnetoresistiven Streifens ist sein Material, das so genannte Permalloy. Dabei handelt es sich um eine Nickel-Eisen-Legierung, die aus 81% Nickel und 19% Eisen besteht. Daneben gibt es weitere geeignete Materialien, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden soll. Zu den gewünschten Eigenschaften dieses Materials zählen insbesondere

- ein hoher magnetoresistiver Effekt  $\Delta\rho/\rho$ , um ein hohes Verhältnis von Signal zu Versorgungsspannung zu erhalten,
- ein hoher spezifischer Widerstand, um einen möglichst großen Widerstand auf kleinstem Raum zu erhalten,
- eine geringe Temperaturabhängigkeit und
- ein kleines Anisotropiefeld  $\mathbf{H}_k$ .

Da die Barberpole ein einfacheres magnetisches Verhalten als das Permalloy aufweisen, muss diese Anordnung gesondert beschrieben werden. Bild 2.15 zeigt die geometrischen Eigenschaften des Aufbaus.



2.15: Geometrische Eigenschaften eines Barberpoles im Detail nach [6]

Zu erkennen ist, dass der Strom in der Mitte um  $\pm 45^\circ$  gedreht wird. Zudem wird angedeutet, dass beim Stromfluss Kanteneffekte auftreten. Der Abstand zwischen zwei leitfähigen Streifen ist  $a$  und die Breite einer Lücke beträgt  $w \cdot \sqrt{2}$ . Damit kann der Widerstand mit

$$R_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{s+a} \cdot \rho \cdot \frac{l}{w \cdot h} \cdot f \quad (2.61)$$

berechnet werden. Dabei ist  $h$  die Schichtdicke und  $f$  ein Korrekturfaktor, der aufgrund der Kanteneffekte eingeführt werden muss. Experimentell hat sich ergeben, dass der Faktor  $f \approx 1,2$  beträgt. Durch die leitfähigen Streifen ist der Widerstand hier circa 2- bis 4-mal kleiner als bei einer Anordnung ohne Barberpole. Ein fließender Strom, wie er auch in Bild 2.15 angedeutet ist, erzeugt stets ein Magnetfeld. Die Komponente in X-Richtung kann mit

$$H_x = \frac{I}{2 \cdot w} \cdot \frac{a}{a+s} \quad (2.62)$$

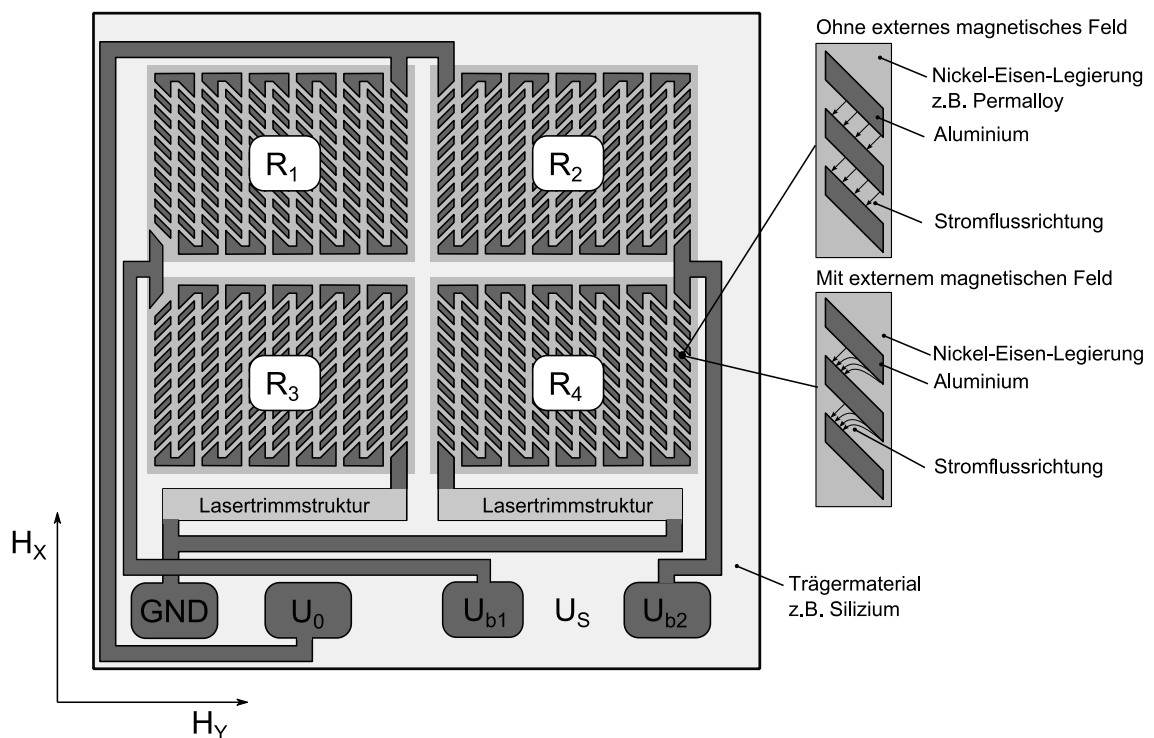
ermittelt werden. Die Linearisierung ist durch beispielsweise die oben beschriebenen Kanteneffekte nicht perfekt. Der größte Teil des Stroms ist um den Winkel  $45^\circ - \xi$  zu der X-Achse geneigt. So definiert sich der Widerstand des Barberpoles über

$$R(\mathbf{H}) = R_0 \pm \alpha \cdot \frac{H_y}{H_0} \cdot \sqrt{1 - \frac{H_y^2}{H_0^2}} - \beta \cdot \frac{H_y^2}{H_0^2} \quad (2.63)$$

mit  $\alpha = \Delta R \cdot \cos(2\xi)$  und  $\beta = \Delta R \cdot \sin(2\xi)$ . Die Gesamtwiderstandsänderung kann daraufhin mit  $\Delta R = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$  ermittelt werden. Werden Barberpole-Widerstände mit

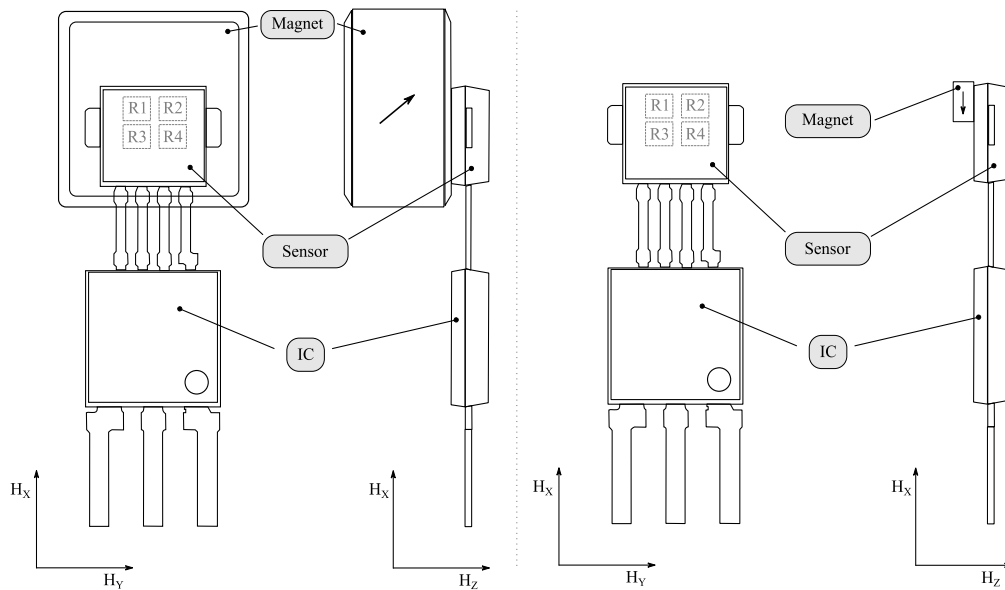
verschiedenen Steigungen (vgl. Bild 2.14) kombiniert, enthält das Brückensignal  $U_S$  den linearen Anteil. Der quadratische Anteil beeinflusst allerdings den Gesamtwiderstand. Dies bedeutet, dass der Brückenwiderstand und somit auch die Brückenspannung wie gewünscht feldabhängig sind. Nichtlinearitäten können durch das Verwenden eines konstanten Stroms beseitigt werden.

Es gibt mehrere verschiedene Bauformen von ABS-Sensoren, die auf diesem Prinzip beruhen. Hier soll nur derjenige vorgestellt werden, der für die vorliegende Arbeit auch verwendet wird. Bild 2.16 zeigt den strukturellen Sensoraufbau.



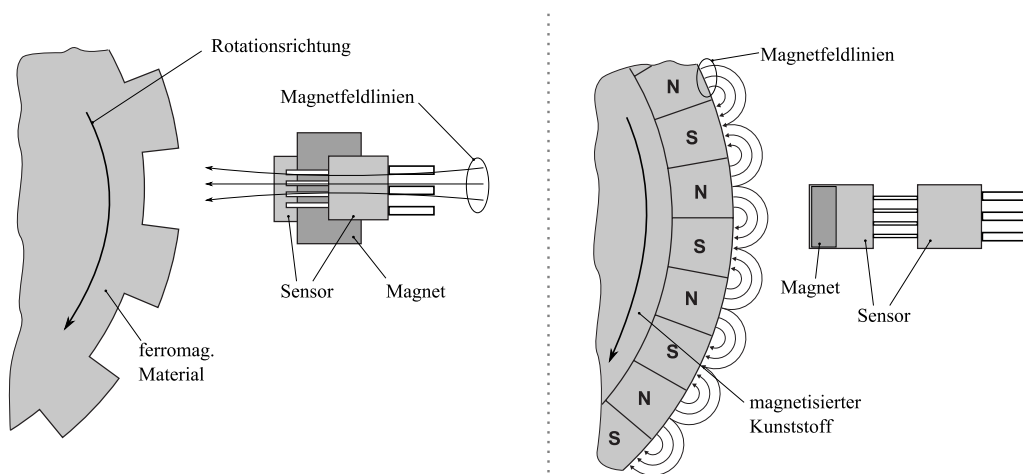
2.16: Struktureller Aufbau des ABS-Sensors nach [14]

Zu erkennen ist, dass das Prinzip, wie es bereits in Bild 2.14 vorgestellt wurde, umgesetzt ist. Die Widerstände weisen eine Mäanderform auf. Das magnetisierbare Material ist hier Permalloy; die leitfähigen Streifen sind aus Aluminium. Über die unterhalb der Widerstände angeordnete Lasertrimmstruktur kann die Brücke bei der Produktion abgeglichen werden. Die mit GND,  $U_0$ ,  $U_{b1}$  und  $U_{b2}$  beschrifteten Flächen sind Bondpads, über die mittels Bonddrähte eine Verbindung nach außen hergestellt wird. Zwischen  $U_{b1}$  und  $U_{b2}$  kann die Brückenspannung gemessen werden, wenn an  $U_0$  und GND eine Betriebsspannung angelegt wird. Rechts neben der Sensorstruktur ist zur erneuten Verdeutlichung das Verhalten des Stroms bei vorhandenem und nicht vorhandenem äußeren Feld schematisch dargestellt.



2.17: ABS-Sensor für passive Encoder (links) und für aktive Encoder (rechts)  
nach [7][8]

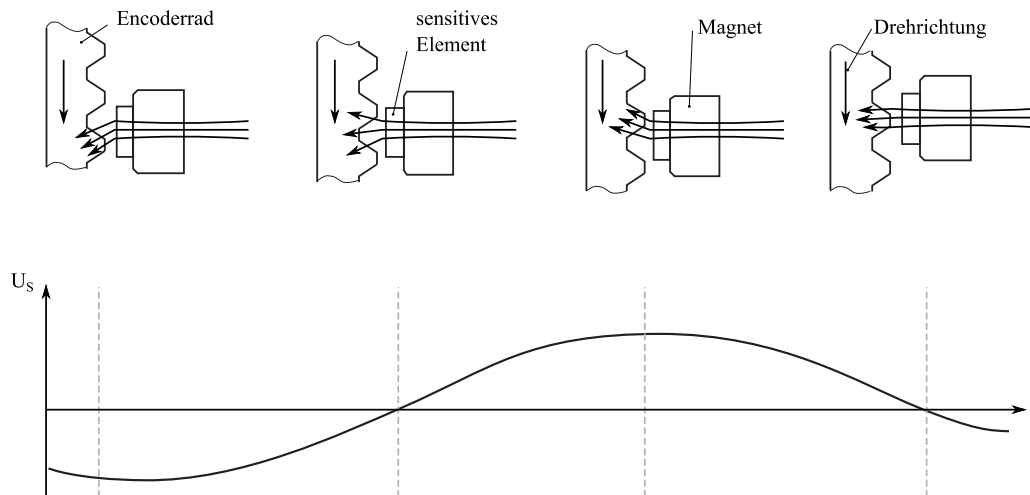
Zur Erweiterung der bisherigen Darstellung des sensitiven Elements zeigt Bild 2.17 die beiden verwendeten Sensoren. Rechts ist der Sensor KMI22/1 zu erkennen, welcher mit passiven Encodern verwendet wird, links der KMI18/2, der mit aktiven Encodern verwendet wird. Bis auf die angebrachten, unterschiedlichen Stützmagneten handelt es sich um zwei baugleiche Sensoren der Firma NXP Semiconductors GmbH. Die Pfeile innerhalb der Magneten zeigen in die Richtung der Magnetisierung. Das IC wertet die Brückensignale aus und gibt ein Protokoll aus, indem es den Strom, der in den Sensor fließt, beeinflusst. Auf die Funktionsweise des IC-Teils des Sensors soll hier nicht näher eingegangen werden, da die Sensorcharakteristik in der AMR-Messbrücke liegt. Im Folgenden wird das Prinzip eines passiven und eines aktiven Encoders nach [9] kurz dargestellt.



2.18: Prinzip von passiven und aktiven Encodern nach [9]



Die linke Seite in Bild 2.18 zeigt einen Ausschnitt aus einem passiven Encoderrad, das vor dem Sensor rotiert. Die Wirkungsweise beruht hier darauf, dass die Magnetfeldlinien, die von dem Stützmagneten ausgehen und durch den Sensor verlaufen, von einem ferromagnetischen Material verbogen werden. Bild 2.19 soll dies noch einmal verdeutlichen.



2.19: Ausgangssignal der AMR-Messbrücke bei verschiedenen Encoderradpositionen bei einem passiven Encoder nach [9]

Der Stützmagnet ist, wie in Bild 2.17 ebenfalls auf der linken Seite zu erkennen ist, magnetisiert. Die Hauptkomponente der Magnetisierung ist in Z-Richtung orientiert; eine weitere Komponente in X-Richtung dient der Stabilisierung und wird in Kapitel 3.4 näher erläutert. Wie bereits erwähnt, ist der Sensor nur in Y-Richtung sensibel, weswegen das Feld in Z-Richtung des Stützmagneten nicht erfasst wird. Werden allerdings die Feldlinien durch den ferromagnetischen Encoder verbogen, entsteht eine messbare Komponente in Y-Richtung.

Auf der rechten Seite in Bild 2.18 ist die Magnetverteilung bei einem aktiven, aus magnetisiertem Kunststoff bestehenden Encoder exemplarisch dargestellt. Rotiert der Encoder vor dem Sensor, so wirken immer unterschiedlich starke Felder auf den Sensor, die detektiert werden können und somit ein Ausgangssignal  $U_S$  erzeugen. Der Stützmagnet hat hier nur eine Komponente in X-Richtung, was ebenfalls in Kapitel 3.4 näher erläutert wird.

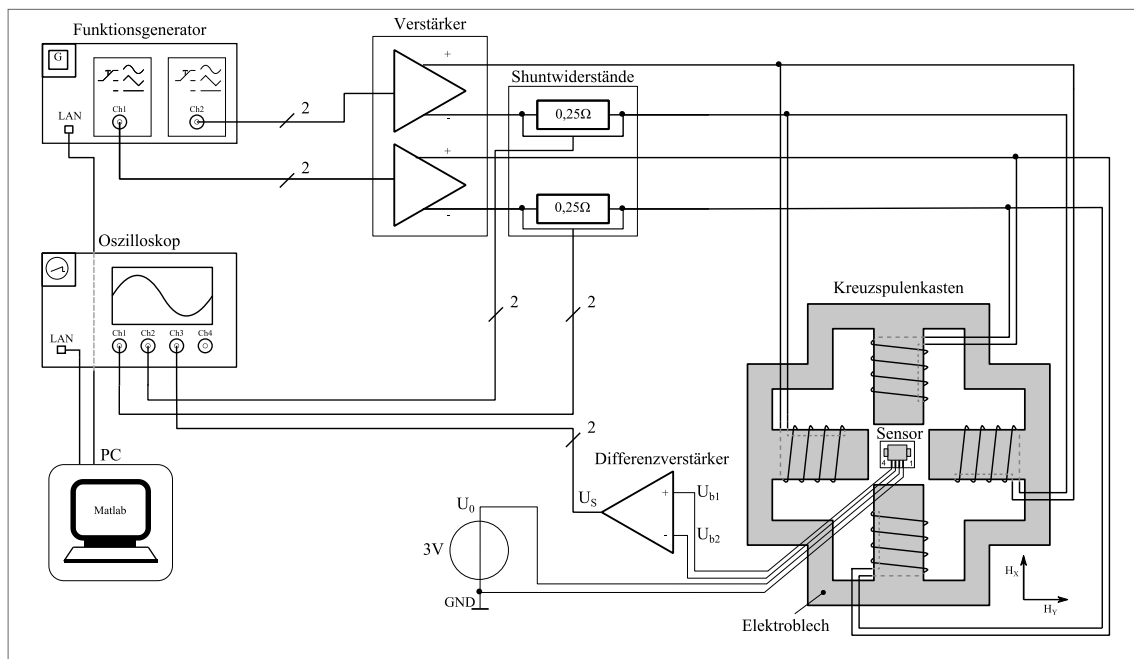
Der ABS-Sensor und seine Grundlagen sind nun hinreichend genau beschrieben. In Kapitel 3 folgt die Beschreibung der Vermessung des Sensors hinsichtlich seines Verhaltens im Magnetfeld. Diese Kenntnisse sollen später dazu verwendet werden, das durch Simulation ermittelte Feld zu einem Ausgangssignal des Sensors zurückrechnen.

### 3 Kreuzspulenmessplatz zur Sensorcharakterisierung

Dieses Kapitel befasst sich zunächst mit dem Aufbau und der Funktionsweise eines Kreuzspulenmessplatzes (KSMP). Das Konzept hierfür wurde bereits von Siebenmorgen in [11] vorgestellt und soll hier aufgegriffen sowie erweitert werden. Anschließend wird überprüft, ob für die Dimensionierung eines neuen KSpK Simulationsergebnisse grundsätzlich geeignet sind. Hierfür werden diese mit den Messergebnissen bereits vorhandener KSpK verglichen. Darauf aufbauend wird ein neuer KSpK konstruiert, um schließlich das Kennfeld der AMR-Messbrücke zu vermessen.

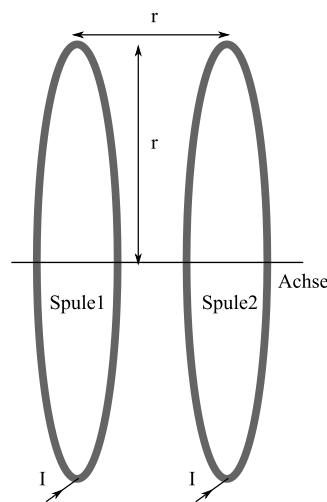
#### 3.1 Aufbau und Anforderungen

In diesem Kapitel soll der Aufbau und die Funktionsweise des KSMP zur Vermessung und Charakterisierung der beiden in Kapitel 2.5 beschriebenen ABS-Sensoren erläutert werden. Bild 3.1 zeigt die entsprechende grafische Darstellung.



3.1: Aufbau des Kreuzspulenmessplatzes zur Vermessung von ABS-Sensoren nach [13]

Die Signale des durch einen PC gesteuerten Funktionsgenerators werden verstärkt, um einen hohen Strom treiben zu können, und an den KSpK angeschlossen. Dabei ist es nötig, ein möglichst homogenes Feld zu erzeugen, welches die zwei Komponenten X und Y hat. Ein in eine Richtung nahezu homogenes Feld kann nach Helmholtz durch einen Aufbau mit Luftspulen erzeugt werden [2]. Dazu werden zwei kreisrunde Leiterschleifen parallel zueinander, auf derselben Achse so angeordnet, dass ihr Abstand dem Radius der Leiterschleifen entspricht. Bild 3.2 zeigt den Helmholtz Aufbau schematisch.



3.2: Helmholtz-Spulen-Anordnung nach [2]

Aufgrund der begrenzten zulässigen Verlustleistung kann in einer solchen Luftspulenordnung nur ein sehr geringes Magnetfeld erzeugt werden, wenn nur eine Kühlung zur Verfügung steht, die auf Konvektion beruht (Lüfter). Der KSpK ist eine Anordnung von zwei Spulenpaaren. Um ein Feld zu erzeugen, das nicht nur in eine Richtung zeigt, sondern zwei Komponenten hat, wären hier um  $90^\circ$  zueinander verdrehte Helmholtz-Spulen ideal. Für die Verwendung mit den vorgestellten ABS-Sensoren ist sowohl die Komponente in Y-Richtung als auch die in X-Richtung wichtig. Letzteres Feld stabilisiert den Arbeitspunkt.

In die beiden Masseleitungen des Messplatzes in Bild 3.1 sind Shuntwiderstände eingebracht, über die mit Hilfe eines Oszilloskops die Spannung gemessen wird, um darüber auf den tatsächlich geflossenen Strom zu schließen. Dies ist nötig, da der Aufbau Temperaturschwankungen unterliegt, die zum Beispiel durch die Umgebungstemperatur, oder durch die wegen des Stromflusses erwärmten Spulen selbst hervorgerufen werden. Auch das Oszilloskop wird mittels des PCs gesteuert und ausgelesen. Des Weiteren ist eine Spannungsquelle zu erkennen, die die AMR-Messbrücke des Sensors mit einer möglichst konstanten Spannung versorgt. Die beiden Halbbrückensignale  $U_{b1}$  und  $U_{b2}$  werden an einen Differenzverstärker beziehungsweise

Instrumentenverstärker angeschlossen, um das Brückensignal zu verstärken. Auch das verstärkte Brückensignal  $U_5$  wird an das Oszilloskop angeschlossen. Die Daten des Oszilloskops werden vom PC mittels Matlab ausgelesen und verarbeitet beziehungsweise ausgewertet.

Um eine geeignete Messung durchführen zu können, muss der Messaufbau folgenden grundsätzlichen Anforderungen genügen:

- Der Sensor muss mit seinem Halter geometrisch in den Aufbau passen und sich positionieren lassen.
- Die Größe des KSpK ist durch den in [10] beschriebenen vorhandenen Aufbau beschränkt.
- Das Feld im Inneren des Kastens soll in einem Bereich von  $3\text{mm}^3$  möglichst homogen sein.
- Der Feldmittelpunkt soll mit dem geometrischen Mittelpunkt möglichst übereinstimmen.
- Für die Bestimmung des Feldmittelpunktes muss die Stromrichtung jeder Spule frei wählbar sein.
- Die Feldstärke soll mindestens  $50\text{kA/m}$  betragen.
- Eine Temperaturmessung zur Überwachung soll vorhanden sein.

Aus [11] sind bereits drei KSpK vorhanden, deren Eckdaten in Tabelle 3-1 aufgelistet sind.

3-1: Übersicht über die technischen Eigenschaften der Kreuzspulenkästen nach [10]

Kreuzspulen- kasten	Spulenfaktor [1/m]	Messraum [mm]	Spulenradius [mm]	Spulentiefe [mm]	Verhältnis
Klein	(1824...1825)	58x58	17,5	15	1:3,74
Mittel	(7736...7705)	46x46			1:3,057
Groß	(17145...17619)	34x34			1:2,48

Der Spulenfaktor gibt darüber Auskunft, wie stark das Magnetfeld in der Mitte der sich gegenüberliegenden Spulen ist, wenn ein Ampere fließt. Dieser Faktor ist zum Beispiel dann wichtig, wenn keinerlei Angaben über die Anzahl der Windungen einer Spule vorhanden sind. Sowohl bei den vorhandenen als auch bei dem neukonstruierten KSpK (vgl. Kapitel 3.3) wurde der Spulenfaktor mit dem Gaussmeter FH55 der Firma MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever gemessen.

Den Anforderungen ist zu entnehmen, dass ein Magnetfeld mit der Mindestfeldstärke von  $50 \text{ kA/m}$  gefordert ist. Der dafür nötige Strom

$$I_{\text{Spulenpaar}} = \frac{H_{\text{soll}}}{\text{Spulenfaktor}_{\text{Spulenpaar}}} \quad (3.1)$$

ist bei Verwendung der vorhandenen KSpK in Tabelle 3-2 aufgelistet.

3-2: Vergleich der Spulenströme für eine Magnetfeldstärke von  $50 \text{ kA/m}$

Kreuzspulen- kasten	Spulenfaktor [1/m]	Spulenstrom für $50 \text{ kA/m}$ [A]
Klein	(1824...1825)	27,4
Mittel	(7736...7705)	6,48
Groß	(17145...17619)	2,88

Da mit der Laborausstattung lediglich ein maximaler Strom von 5A bei 36V getrieben werden kann, ist eine Umsetzung nur mit dem Kasten „Groß“ denkbar. Auf Grund der zu starken Erwärmung der Spulen in diesem Kasten würde sich dieser bei einem Strom von 2,88A im Dauerbetrieb jedoch zerstören. Daher ist es notwendig, einen neuen Kreuzspulenkasten zu entwerfen, der den Anforderungen genügt. Luftspulen fallen aus dem oben genannten Grund aus, weswegen der magnetische Fluss in einem Neuaufbau mittels eines ferromagnetischen Materials konzentriert und das Magnetfeld wie oben beschrieben verstärkt werden muss. Diese Vorgehensweise wird zum Beispiel auch bei Transformatoren oder Elektromagneten angewendet. Der Nachteil von ferromagnetischem Material ist, dass es ein magnetisches „Gedächtnis“, eine Hysterese hat (vgl. Kapitel 2.2.2). Dies kommt insbesondere bei geringen Feldstärken zum Tragen. Auf die Auswirkung auf die Messung wird in Kapitel 3.4 näher eingegangen.

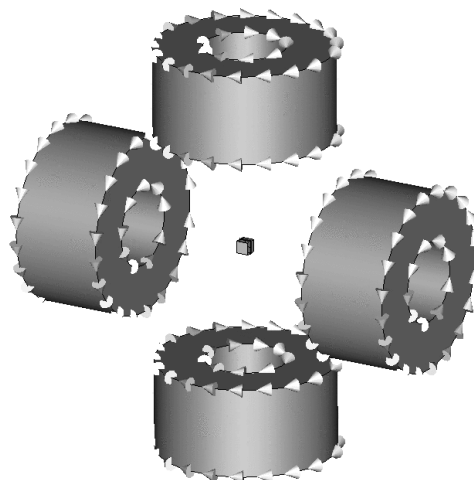
## 3.2 Simulation

Bevor ein neuer KSpK entworfen werden kann, müssen die vorhandenen mittels mehrerer Simulationen untersucht werden, um zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Simulation mit denen der bereits erfolgten Messung übereinstimmen. Damit wird sichergestellt, dass Simulationsergebnisse auch für die Dimensionierung des neuen KSpK verwendet werden können. Wie die folgenden Ausführungen zeigen werden,

ergeben mehrere Simulationen und Vergleichsmessungen tatsächlich, dass eine gute Abbildung der Realität vorliegt. Als Simulationsumgebungen kommen zum einen Ansoft Maxwell 14 und zum anderen das CST EM Studio zum Einsatz. Damit ist es möglich, statische Magnetfelder zu berechnen. Beide Umgebungen liefern annähernd die gleichen Ergebnisse hinsichtlich der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Da dem Verfasser dieser Arbeit die CST EM Studio-Umgebung bereits als Werkzeug zur Simulation von Hochfrequenz-Aufbauten mit dem CST Microwave Studio bekannt ist, fiel die Entscheidung auf die Weiternutzung dieser Plattform.

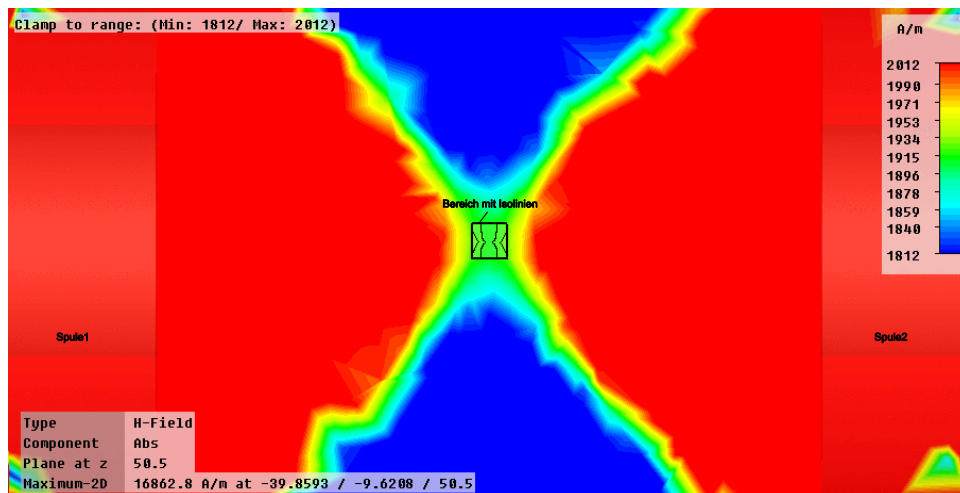
Um die Grundlage für die Simulation zu schaffen, wird zunächst die Geometrie in CST erstellt. Da die Kästen „Mittel“ und „Groß“ nach [11] bis auf die Aufsätze auf den Spulenkörpern im Kasten „Groß“ baugleich sind, ergeben sich zwei Modelle. Die erwähnten Aufsätze können im Simulationsmodell durch An- und Abwählen hinzugefügt beziehungsweise entfernt werden. Sie haben die Funktion, die Spulenkern näher zusammenzubringen und dadurch die Feldstärke zu erhöhen. Zur Verwendung kommen fertige Elektromagneten, die über einen Metallrahmen gekoppelt werden. Bei dem KSpK „Klein“ handelt es sich um handgewickelte Luftspulen. Diese Luftspulen haben den Vorteil, dass die Anzahl ihrer Windungen und ihre Geometrie genau bekannt sind. Aus diesem Grund soll mit der Erstellung dieses Modells in der Simulationsumgebung begonnen werden. Für das Modell der beiden anderen Kästen wird ein durch zu starke Erwärmung zerstörter Elektromagnet in der Mitte auseinandergesägt. Dadurch kann die Geometrie genau bestimmt werden. Über den Drahtquerschnitt kann die Anzahl der Windungen berechnet werden.

Zunächst wird das erste Modell vorgestellt. Bild 3.3 zeigt das Modell des KSpK „Klein“.



3.3: CST-Modell des Kreuzspulenkastens "Klein" mit Luftspulen

In der Mitte des Bildes 3.3 ist die Messbox mit der Größe  $3\text{mm}^3$  zu erkennen. Außen um diese herum sind zwei Spulenpaare angeordnet. Die grauen Kegelpfeile auf den Spulen geben die Richtung an, in die der Strom fließt. Nachdem das Modell erstellt worden ist, kann dieses parametrisiert werden. Ein Parameter ist dabei zum Beispiel die Anzahl der Windungen; in diesem Fall sind dies  $N = 1120$ . Weiterhin muss die Größe der Simulationsumgebung eingestellt und ein geeignetes Mesh gewählt werden. Die Größe der Simulationsumgebung wird so eingestellt, dass von allen Außenkanten ein Abstand von 50mm eingehalten wird. Außerdem wird ein tetraederförmiges Mesh gewählt, da dies bessere Ergebnisse hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Simulation mit der Messung liefert. Nun kann die Feldverteilung im Kasten ermittelt werden. Dazu wird wie bei der Bestimmung des Spulenfaktors nur ein Spulenpaar mit Strom versorgt. Das bedeutet, dass 1A in den Aufbau fließt, entsprechend 0,5A je Spule. Bild 3.4 zeigt das Ergebnis der Simulation.



3.4: Feldverteilung im Kreuzspulenkasten "Klein" bei 1A Spulenstrom, Isolinien im Zentrum zeichnerisch ergänzt

Zur besseren Übersicht wird das 3D-Feld auf einer 2D-Ebene dargestellt. In der Mitte ist ein schwarzes Quadrat zu erkennen, das eine Kantenlänge von 3mm hat. Dies ist der Bereich, in dem der Sensor platziert werden soll. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Magnetfeldstärke innerhalb dieses Bereichs nahezu konstant ist und somit ein Zeichen für annähernde Homogenität des Feldes darstellt. Entlang der auf den innerhalb des Quadrates hinzugefügten Linien hat das Magnetfeld dieselbe Feldstärke. Diese Art der Simulation ist für alle KSpK durchgeführt worden. Der jeweils simulierte Spulenfaktor kann nun mit dem in [11] ermittelten verglichen werden. Dabei wird für den bereits gemessenen Spulenfaktor der Mittelwert der Vorgabewerte gebildet.

## 3-3: Vergleich der gemessenen mit den simulierten Spulenfaktoren

Kreuzspulen- kasten	Spulenfaktor gemessen [1/m]	Spulenfaktor simuliert [1/m]	Abweichung [1/m]	Abweichung [%]
klein	1825	1912	87	4,77
mittel	7720	8183	463	6
groß	17382	19112	1730	9,95

Tabelle 3-3 ist zu entnehmen, dass die Abweichung zwischen simuliertem und gemessenem Spulenfaktor jeweils unter 10% liegt. Die wichtigste Aussage kann jedoch über den KSpK „Klein“ getroffen werden, da hier die tatsächliche Anzahl der Windungen bekannt ist und somit nicht angenähert werden musste. Die Abweichung liegt hier bei unter 5%. Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass die Simulation als Entwicklungswerkzeug genutzt werden kann.

### 3.3 Konstruktion

Für die Konstruktion eines neuen KSpK ist es wichtig, dass dieser möglichst preisgünstig ist und mit den hauseigenen Mitteln erstellt werden kann. Als Anregung dient hierfür der Aufbau von Transformatoren. Hier kommen so genannte Elektrobleche für die Feldkopplung zum Einsatz. Diese und dazu passende Spulenkörper sind im Handel erhältlich. Aufgrund der maximalen Außenmaße, die sich durch den in [11] erstellten KSMP ergeben, wird für den neuen KSpK eine Elektroblechgröße mit einer Kantenlänge von 106mm gewählt. Aus dieser Struktur kann nun ein erstes Modell in CST erstellt werden.

Lässt man die E-Kern-Bleche nur minimal überlappen, damit sich ein geschlossener Kern ergibt, erhält man in der Mitte dieser Anordnung zwischen den Blechen einen Abstand von 51mm. Zusätzlich kann ein kompletter Spulenkörper mit Kupferdraht umwickelt werden, sodass die mögliche Anzahl der Windungen erhöht wird. Soll nur der halbe Spulenkörper Verwendung finden, kann das Elektroblech dahingehend verändert werden, dass sich in der Mitte nur noch ein minimaler Abstand von 36mm ergibt. Durch den halben Spulenkörper begrenzt sich die Anzahl der Windungen auf die Hälfte, womit sich prinzipiell auch die Magnetfeldstärke in der Mitte reduziert. Durch den dichteren Abstand der E-Kerne zueinander erhöht sich das Feld jedoch anstattdessen.



Betrachtet man die Homogenität, so ist zu erwarten, dass sich ein größerer Abstand positiv auswirkt. Hier muss zwischen der geforderten Homogenität und der geforderten Magnetfeldstärke abgewogen werden. Eine höhere erreichbare Feldstärke durch das Verringern des Abstandes zieht einen Verlust an Homogenität nach sich und umgekehrt. Weiterhin ist es notwendig, einen passenden Kupferdraht für die Bewicklung der Spulen zu wählen. Dabei ist das Entscheidungskriterium der maximal mögliche Stromfluss. Als Quelle kommen hier Verstärker der Firma KEPCO zur Verwendung, die einen maximalen Strom von 5A bei maximal 36V Ausgangsspannung liefern können. Der Widerstand einer Spule berechnet sich durch

$$R_{Spule} = R_{=} \cdot N \cdot l_m \quad (3.2)$$

mit  $R_{=}$  dem Widerstand des 1m langen Kupferdrahtes,  $N$  der Anzahl der Windungen und  $l_m$  der mittleren Länge einer Windung.  $l_m$  ergibt sich aus der Geometrie des Spulenkörpers und beträgt hier 0,2120m je Windung. Verschiedene Kupferdrahtdurchmesser haben verschiedene Gleichstromwiderstände, von denen Tabelle 3-4 eine Auswahl zeigt.

3-4: Auswahl an Gleichstromwiderständen von Kupferdraht bei 20°C

Durchmesser [mm]	Gleichstromwiderstand bei 20°C [Ohm/m]
0,300	0,242
0,355	0,173
0,400	0,136
0,500	0,087
0,600	0,060
0,630	0,055
0,800	0,034
1,000	0,022

Wie zu erkennen ist, geht ein größerer Durchmesser stets mit einem kleineren Widerstand einher. Wie Tabelle 3-5 und 3-6 zeigen werden, verringert sich dadurch allerdings auch die maximale Anzahl von Windungen auf dem Spulenkörper. Für die Berechnung der maximalen Anzahl der Windungen gilt

$$N_{max} = \frac{A_{Wickelraum\ Spule}}{A_{Draht}} \cdot k_{Cu} \quad (3.3)$$

mit  $A_{Wickelraum, halbe\ Spule} = 25mm \cdot 18mm = 450mm^2$  und  $A_{Draht} = \pi \cdot d_{Draht}^2$ .

Der Bereich der vorhandenen Drahtdurchmesser liegt zwischen 0,3mm und 0,7mm. Nach [12] sollte ein Füllfaktor zwischen  $k_{Cu,d=0,3mm} = 0,54$  und  $k_{Cu,d=0,7mm} = 0,61$  angenommen werden. Zur Vereinfachung wird ein Füllfaktor von  $k_{Cu} = 0,54$  angenommen, da mit diesem die Abweichung bei Verwendung eines größeren Drahtdurchmessers gering ist und sich die Anzahl der Windungen in diesem Fall erhöht, was auch eine Erhöhung der Feldstärke nach sich zieht. Zur Erfüllung der Anforderung von einer Mindestfeldstärke von  $50kA/m$  ergeben sich somit verschiedene in Frage kommende Durchmesser. Generell ist ein größerer Drahtdurchmesser zu bevorzugen, damit die durch den Stromfluss entstehende Wärme besser abtransportiert werden kann.

Zunächst soll die maximal erreichbare Feldstärke für verschiedene Drahtdurchmesser bei einem Innenabstand von 51mm berechnet werden. Tabelle 3-5 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Sowohl hier als auch in Tabelle 3-6 wird davon ausgegangen, dass jeweils nur der halbe Spulenkörper bewickelt ist, da dies den Bau vereinfacht.

3-5: Simulationsergebnisse des Kreuzspulenkastens bei einem Innenabstand von 51mm mit der maximal erreichbaren Feldstärke für  $U_{max} = 36V$ ,  $I_{max} = 2,5A$

Durchmesser [mm]	Maximale Windungsanzahl	Spulenfaktor simuliert [1/m]	Widerstand [Ohm]	Strom [A]	Leistung [W]	Feldstärke [A/m]
0,400	1934	25947	55,755	0,646	23,3	33507
0,500	1238	16384	22,842	1,576	56,7	51642
0,600	860	11228	11,016	2,5	68,9	56140
0,630	780	10283	9,063	2,5	56,6	51415
0,800	483	6256	3,486	2,5	21,8	31280

Tabelle 3-5 ist zu entnehmen, dass sich hier drei mögliche Zusammenstellungen ergeben, die die genannte Anforderung von mindestens  $50kA/m$  Feldstärke erfüllen. Wenn nur die geforderte Feldstärke erreicht werden soll, wäre hier die Wahl eines Drahtdurchmessers von 0,6mm die beste. Dabei sollte ein Sicherheitsabstand von +10% eingehalten werden. Dies ist die Abweichung, die sich bei dem Vergleich zwischen Simulation und Messung ergeben hat (vgl. Kapitel 3.2). Diese Forderung ist bei 0,6mm Drahtdurchmesser erfüllt. Allerdings wird hierfür eine Leistung von circa 70W benötigt, was eine starke Erwärmung zur Folge hat. Um dies zu umgehen, besteht zum einen die Möglichkeit, wie bei dem KSpK „Mittel“ Aufsätze zu verwenden, um die Feldstärke zu erhöhen. Eine Tabelle mit den Ergebnissen kann in Anhang A Simulationsergebnisse gefunden werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, den Innenabstand auf 36mm zu verkleinern. Da die Konstruktion von Aufsätzen mit hohem Aufwand verbunden und

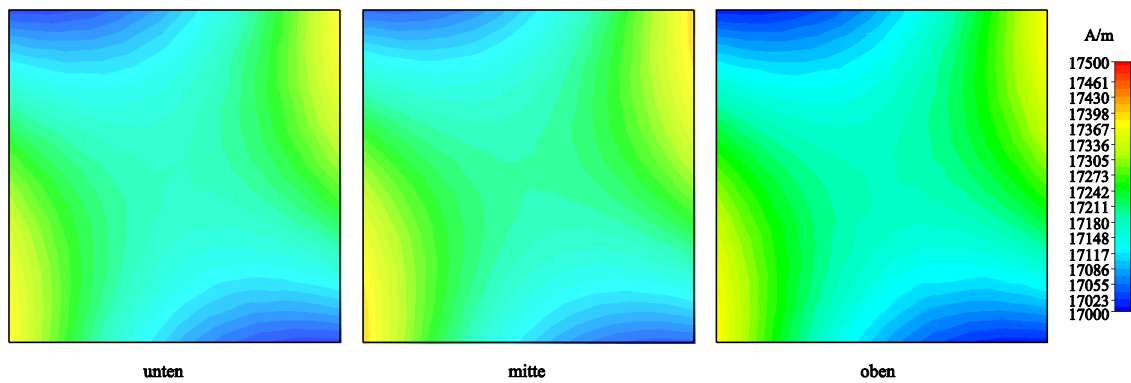
die Güte der Übergänge der Elektrobleche zu den Aufsätzen nicht vorhersagbar ist, wird diese zweite Möglichkeit näher untersucht. Für diese müssen die E-Kern-Bleche nicht in dem Bereich modifiziert werden, in dem das Magnetfeld eine hohe Güte haben soll, sondern nur an den Seiten, an denen eine Kopplung angrenzender E-Kern-Bleche stattfindet. Damit ergibt sich zwischen den Kernseiten eine Grundfläche des Raumes von 36mm x 36mm. In Tabelle 3-6 sind die Simulationsergebnisse für verschiedene Drahtdurchmesser bei einem Innenabstand von 36mm eingetragen.

3-6: Simulationsergebnisse des Kreuzspulenkastens bei einem Innenabstand von 36mm mit der maximal erreichbaren Feldstärke für  $U_{max} = 36V$ ,  $I_{max} = 2,5A$

Durchmesser [mm]	Maximale Windungszahl	Spulenfaktor simuliert [1/m]	Widerstand [Ohm]	Strom [A]	Leistung [W]	Feldstärke [A/m]
0,400	1934	37759	55,755	0,646	23,3	48760
0,500	1238	23831	22,842	1,576	56,7	75115
0,600	860	16515	11,016	2,5	68,9	82575
0,630	780	14940	9,063	2,5	56,6	74700
0,800	483	9076	3,486	2,5	21,8	45380

Zu erkennen ist, dass wieder die Drahtdurchmesser von 0,5mm bis 0,63mm in Frage kommen. Am geeignetsten ist erneut ein Drahtdurchmesser von 0,6mm, weil hier ein Strom von 1,52A, dies bedeutet eine Leistung von 25W für 50 kA/m benötigt wird. Auf Grund von nicht ausreichend vorhandenem Draht mit 0,6mm Durchmesser muss auf den 0,63mm dicken Draht zurückgegriffen werden. Für eine Feldstärke von 74,7kA/m wird laut Tabelle ein Strom von 2,5A benötigt. Umgerechnet auf die geforderten 50kA/m muss ein Strom mit einer Stärke von 1,67A fließen beziehungsweise ebenfalls eine Leistung von 25W vorhanden sein. Da die Spulen mit einer Maschine per Hand gewickelt wurden, hat sich jedoch herausgestellt, dass nicht nur 780, sondern 888 Windungen gewickelt werden können, womit sich ein tatsächlicher Füllfaktor von  $k_{Cu,d=0,63mm} = 0.615$  ergibt. Durch eine erneute Simulation mit der erhöhten Windungszahl zeigt sich, dass eine maximale Feldstärke von  $H_{max}(I_{max} = 2,5A) = 84,89 \frac{kA}{m}$  erreicht werden kann. Dies bedeutet, dass für die geforderte Feldstärke nur noch eine Stromstärke von  $I_{50 \frac{kA}{m}} = 1,47A$ , also eine Leistung von circa 22W notwendig ist.

Die Homogenität ist ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Konstruktion eines geeigneten KSpK. Deshalb soll im Folgenden die Feldverteilung innerhalb des KSpK näher betrachtet werden. Bild 3.5 zeigt Schnitte der simulierten Feldverteilung.



3.5: Simulierte Feldverteilung im Kreuzspulenkasten mit 27mm<sup>3</sup> Messbox in der Mitte

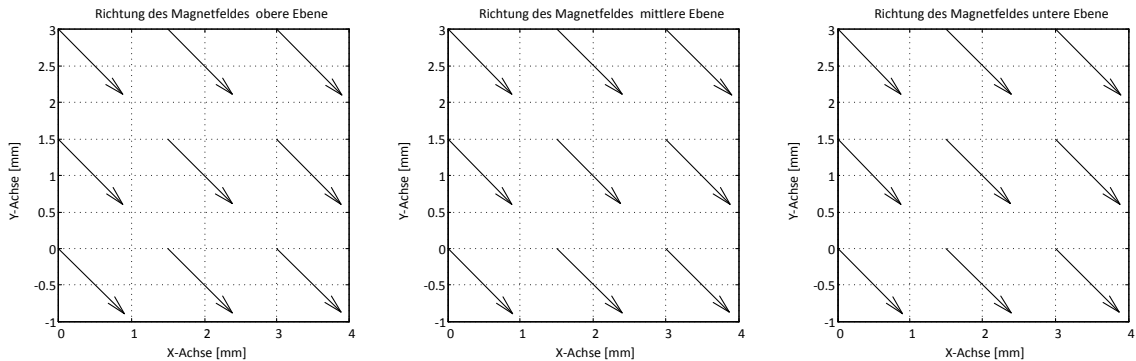
In das Zentrum des KSpK wird ein Vakuumwürfel mit den Maßen (3 x 3 x 3)mm beziehungsweise (9 x 3 x 3)mm eingebracht. Dies dient dazu, das Feld in diesem Raum genauer zu berechnen, da in diesem Bereich später der ABS-Sensor platziert werden soll. Durch die Spulenpaare fließt der gleiche Strom. Dadurch ergeben sich in beide Richtungen dieselben Feldstärken. Somit muss nur eine Komponente betrachtet werden. Tabelle 3-7 zeigt die Simulationsergebnisse für diese zwei Fälle.

3-7: Simulationsergebnisse der Homogenitätsbetrachtung des Kreuzspulenkastens

Messbox- höhe [mm]	Minimal- feldstärke [A/m]	Maximal- feldstärke [A/m]	$\Delta$ -Feldstärke [A/m]	Abweichung [%]
3	17151	17243	92	0,54
9	17044	17246	202	1,19

Eine Positionierung in der X-Y-Ebene ist über den Kreuzlaser einfach zu realisieren; die Höhe hingegen ist schwieriger zu finden. Befindet man sich exakt auf der richtigen Höhe, gilt das Ergebnis der ersten Zeile. Bezogen auf die Minimalfeldstärke ergibt sich eine prozentuale Abweichung von 0,54%. Wenn jedoch eine gewisse Ungenauigkeit in der Höheneinstellung angenommen und eine Höhenabweichung von  $\pm 3$ mm zugelassen wird, erhöht sich die Abweichung auf 1,19%. Um eine gute Aussage über die Homogenität treffen zu können, muss zudem die Richtung des Feldes ausgewertet werden. Dazu wird wieder dieselbe Messbox betrachtet und der Betrag, genauer der Winkel der Vektoren, an ausgewählten Raumpunkten untersucht. Als repräsentative Bereiche für die Berechnung werden die Eckpunkte und die jeweiligen Punkte dazwischen erachtet. Somit ergeben sich pro Ebene neun Werte für eine Auswertung.

Bild 3.6 gibt einen optischen Aufschluss darüber, in welche Richtung das Magnetfeld innerhalb der Messbox zeigt, wenn beide Spulenpaare mit dem gleichen Strom gespeist werden.



### 3.6: Gleichförmige Richtung des Magnetfeldes innerhalb der Messbox auf drei Ebenen

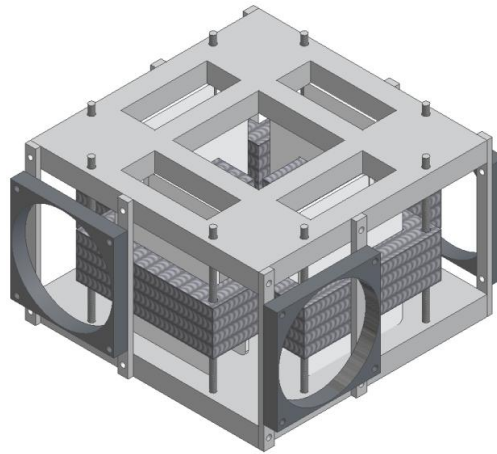
Da Homogenität erreicht werden soll, entspricht der gleichmäßige Verlauf der Feldrichtung den Erwartungen. Tabelle 3-8 zeigt die zu Bild 3.6 gehörigen Werte für die Winkel.

3-8: Winkel der Feldvektoren innerhalb der 3mm hohen Messbox

Ebene	Minimaler Winkel [°]	Maximaler Winkel [°]	$\Delta$ Winkel [°]	Mittelwert [°]	Abweichung [%]
Unten	-45,3291	-44,6719	0,6572	-45,0013	1,4604
Mitte	-45,3309	-44,6698	0,6111	-45,0001	1,4692
Oben	45,3305	-44,6694	0,6111	-45,0000	1,4691

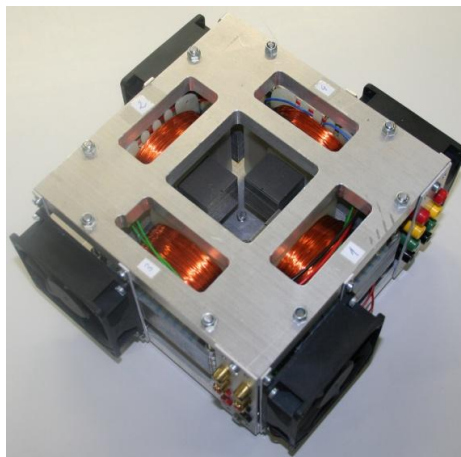
Die Abweichung von minimalem zu maximalem Winkel beträgt für jede Ebene circa 1,47%. Wird die Höhe der Box auf 9mm erweitert, erhöht sich die Abweichung des Winkels auf 1,65%. Damit ist sichergestellt, dass der halbe Spulenkörper Verwendung finden kann. Nun ist eine Umsetzung des Entwurfs des neuen KSpK möglich. Die Konstruktionszeichnungen dazu befinden sich in Anhang C Technische Zeichnungen.

Bild 3.7 zeigt ein vereinfachtes Konzept des zu erstellenden KSpK.



3.7: Konzept des neuen Kreuzspulenkastens als 3D-Modell

In der vertikalen Mitte ist der E-Kern mit welligem Muster dargestellt. In den Deckel sind rechteckige Aussparungen eingearbeitet, die dem besseren Abtransport von entstehender Wärme dienen. Zusätzlich sind vier Lüfter mit der Kantenlänge 80mm vorgesehen. Durch Gewindestangen werden der Deckel, der Kern und die Bodenplatte miteinander verbunden. Bis auf die Gewindestangen und die später zu verwendenden Schrauben sind alle Komponenten aus Aluminium zu fertigen, um so wenig ferromagnetisches Material wie möglich in der Nähe des Messraumes zu haben. Die Temperaturüberwachung wird so realisiert, dass beim Wickeln der Spulen ein  $10k\Omega$  NTC Widerstand mit eingelegt wird. Dieser Widerstand ist passend zum Temperaturanzeige-konzept aus [11]. Somit kann die Temperatur jeder Spule gemessen und angezeigt werden. Bild 3.8 zeigt den anhand des vorgestellten Konzeptes konstruierten neuen KSpK.

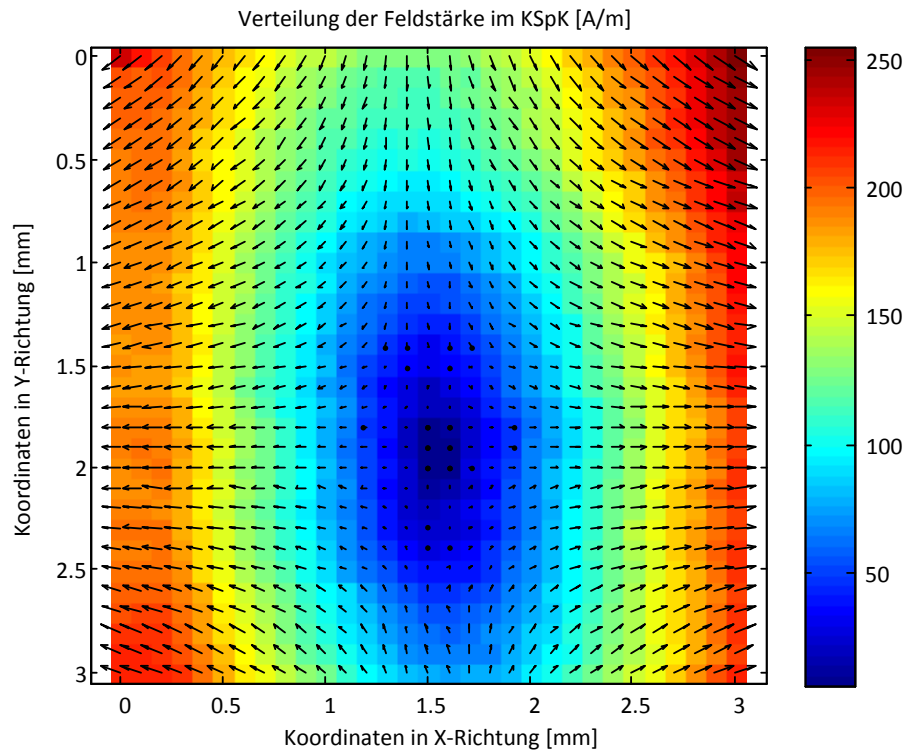


3.8: Umsetzung des neuen Kreuzspulenkastens

Auf der rechten Seite sind farblich unterschiedliche 4mm Buchsen angebracht. Diese dienen dem Anschluss der Spulen, von denen jede einzeln mit Strom versorgt wird, wodurch es möglich ist, die Stromflussrichtung frei zu wählen. Am unteren Rand sind vier Cinch-Buchsen angebracht, an denen die Widerstandswerte der NTC gemessen werden. Darunter befinden sich 2mm Buchsen, über die die Lüfter betrieben werden können. Nicht im Konzept dargestellt ist eine Positionierhilfe für den Sensor, die jedoch durch einen in der geometrischen Mitte angebrachten Kreuzlaser realisiert ist.

### 3.4 Kennfeldvermessung der ABS-Messbrücke

Eine Kennfelderfassung ist notwendig, da das magneto-resistive Verhalten des Sensors nicht simuliert werden kann. Aus diesem Grund muss der ABS-Sensor auf eine geeignete Weise charakterisiert werden. Die bisher dargestellte Sichtweise geht stets von einer einzigen Kennlinie des Sensors bei einer Verwendung aus. Nun erfolgt der Wechsel von der zweidimensionalen Kennlinie zu dem dreidimensionalen Kennfeld. Dazu muss der KSpK mit Hilfe des Gaussmeters FH55 zunächst hinsichtlich seiner Feldverteilung innerhalb des Messraums charakterisiert werden. Als erstes wird hierfür die Lage der Feldmitte innerhalb des KSpK bestimmt. Dazu werden die Spulen so gepolt, dass sich in der Mitte ein magnetfeldfreier Raum ergibt. Der sich ergebende Messaufbau entspricht dem in [10] vorgestellten. Danach wird ein Raster über den möglichen Messraum gelegt und dieser zweimal durchfahren. Beim ersten Durchlauf wird das Gaussmeter so befestigt, dass die lange Kante der Messsonde parallel zum ersten Spulenpaar ausgerichtet ist und somit hauptsächlich das Feld dieses Spulenpaares gemessen wird. Beim zweiten Durchlauf wird die Messsonde um  $90^\circ$  gedreht, um dadurch das Feld des zweiten Spulenpaares zu erfassen. Im Anschluss daran werden beide Messungen übereinander gelegt, um so die resultierende Richtung des Feldvektors zu berechnen. Bild 3.9 zeigt die gemessene Feldstärkenverteilung in der geometrischen Mitte des KSpK.

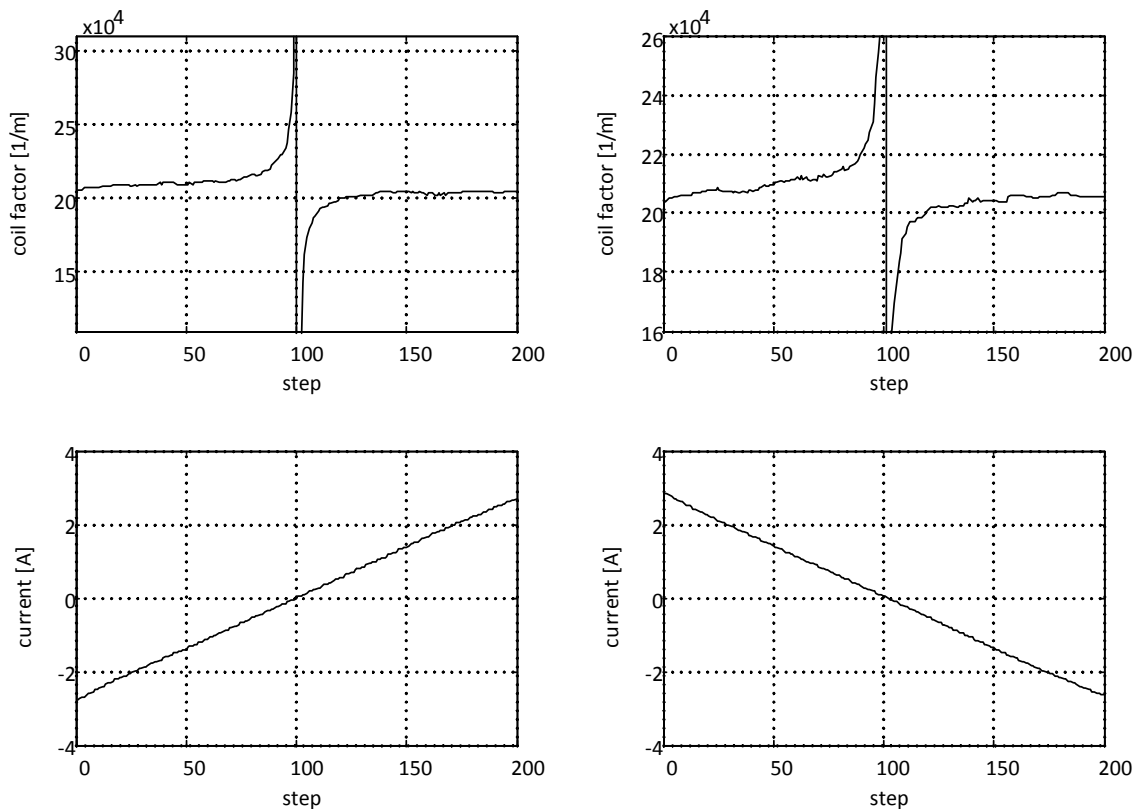


3.9: Gemessene Feldverteilung im Kreuzspulenkasten bei Nullpunktsuche

Die Feldmitte in X-Richtung stimmt nahezu optimal mit der geometrischen Mitte überein, wohingegen in Y-Richtung eine Verschiebung von circa 0,5mm zu erkennen ist. Diese kann sich dadurch ergeben, dass die Messsonde während der Messung gedreht werden muss und eine genaue Positionierung daher nur bedingt möglich ist. Betrachtet man die Feldstärke, so ist zu erkennen, dass in der Mitte kaum ein Magnetfeld vorhanden ist. Dabei ist zu bedenken, dass das Erdmagnetfeld mitgemessen wird, da sich der Aufbau nicht in einem feldfreien Raum befindet. An der Richtung der Pfeile ist zu erkennen, dass die Spulenpaare entgegengesetzt von Strom durchflossen werden, womit die ovale Form der Feldverteilung begründet werden kann. Weiterhin ist festzustellen, dass keine hohen Abweichungen in der Stärke des Magnetfeldes auftreten. Wird das Sensorelement mit den Maßen 1,2mm x 1,2mm so platziert, dass die AMR-Messbrückenmitte in der Mitte des KSpK ist, ergibt sich eine Abweichung von weniger als 100A/m (vgl. Bild 3.9).

Eine weitere wichtige zu bestimmende Größe ist der Spulenfaktor. Um diesen zu messen, wird eines der Spulenpaare von Strom durchflossen und die Feldstärke in der in Bild 3.9 gezeigten Mitte gemessen. Um Hysterese-Effekte feststellen zu können, wird der Spulenfaktor nicht nur bei 1A Stromstärke, sondern in einem Bereich von -3A bis 3A beziehungsweise 3A bis -3A bestimmt. Bild 3.10 zeigt die Ergebnisse dieser Vermessung.

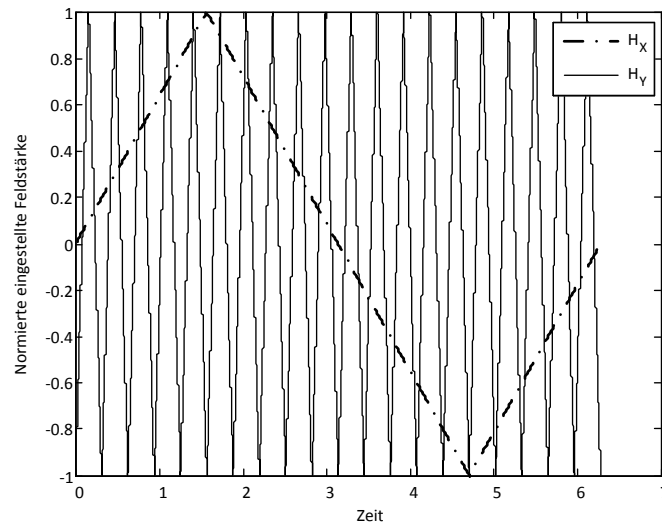




3.10: Ergebnis der Spulenfaktormessung bei verschiedenen Strömen

Die oberen zwei Darstellungen zeigen die Spulenfaktoren bei den darunter gezeigten Strömen. Der Spulenfaktor ist bei größeren Strömen annähernd konstant. In der Mitte (Schritt  $100 \pm 10$ ) sind die Auswirkungen der Hysterese des ferromagnetischen E-Kern-Materials zu erkennen. In diesem Bereich stimmt der Spulenfaktor nicht überein. Dies bedeutet, dass Messungen in diesem Bereich fehlerhaft sein werden. Diesen kritischen Bereich außer acht gelassen, beträgt der mittlere Spulenfaktor  $20617 \text{ m}^{-1}$ .

Nun kann der ABS-Sensor anstelle des Gaussmeters in den KSpK eingebracht werden. Ziel einer derartigen Vermessung ist es, die Ausgangsspannung der AMR-Messbrücke für jedes mögliche Paar von Feldstärken in X- und Y-Richtung zu erhalten. Dazu kann jedes Paar von Feldstärken nacheinander angelegt werden, um so das Kennfeld Punkt für Punkt zu erstellen. Da die gewünschte Auflösung des Kennfeldes  $200 \times 200$  Punkte beträgt, würde dies bedeuten, dass eine Messdauer von circa 11 Stunden benötigt werden würde, wenn optimistischerweise nur eine Sekunde pro Messpunkt angenommen wird. Um Kennfelder schneller zu erzeugen, werden die Feldstärken nach einem Dreiecksmuster durchfahren, bei dem möglichst jeder Punkt in dem Kennfeld getroffen wird. Eine schematische Darstellung dessen zeigt Bild 3.11.

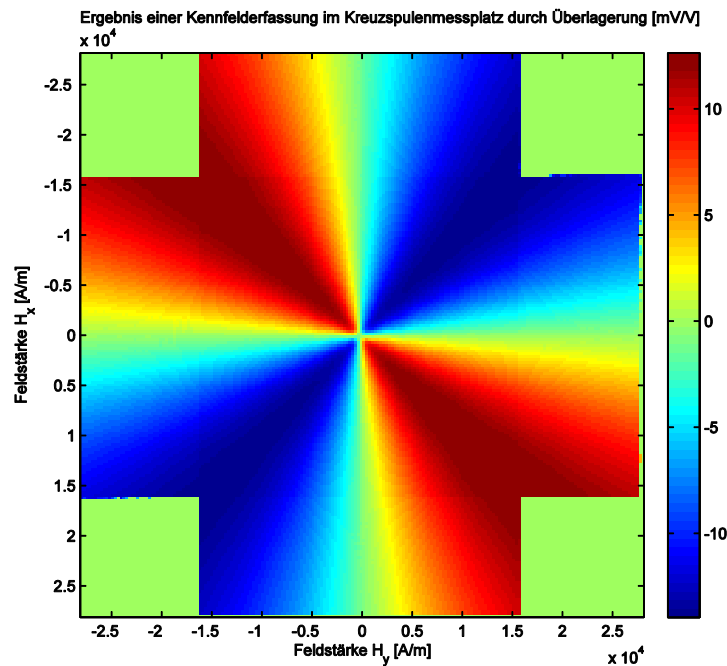


3.11: Schematische Darstellung der Feldstärkenansteuerung der X- und Y-Achse zur Kennfelderzeugung

Für die Kennfelderzeugung ist es nötig, dass die eine Feldkomponente ein Dreieck langsam und die andere dieses mit einer deutlich höheren Frequenz durchfährt. Außerdem darf der Faktor zwischen diesen beiden Frequenzen nicht ganzzahlig sein, da sonst nach einigen Perioden immer wieder dieselben Punkte getroffen werden. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Spulen eine Induktivität besitzen, die einer Stromänderung entgegenwirkt. Daher sollte die schnellere der beiden Frequenzen so niedrig wie möglich sein. Ein Faktor von 40,15 hat sich als geeignet erwiesen, einen hohen Füllgrad des Kennfeldes zu gewährleisten. Der verwendete Frequenzgenerator lässt eine minimale Frequenz von  $0,1\text{Hz}$  zu. Dies bedeutet, dass die schnellere Frequenz auf  $40,15 \cdot 0,1\text{Hz} = 4,015\text{Hz}$  festgelegt wird. Um eine höhere Dichte zu erreichen, werden zum einen mehrere dieser Messungen nacheinander durchgeführt und zum anderen die Kanäle zusätzlich vertauscht. Bei der Auswertung werden diese Felder dann übereinandergelegt.

### 3.4.1 Kennfelderfassung ohne Stützmagnet

Der Messaufbau, der KSMP, ist in Bild 3.1 dargestellt. Für diese Messung muss der am Sensor angebrachte Stützmagnet entfernt werden. Das Ergebnis einer Messung ist in Bild 3.12 dargestellt. Auf der horizontalen Achse ist die Feldstärke in Y- und auf der vertikalen Achse die Feldstärke in X-Richtung angetragen. Durch den Farbverlauf ist die Ausgangsspannung in  $mV/V$  kodiert.



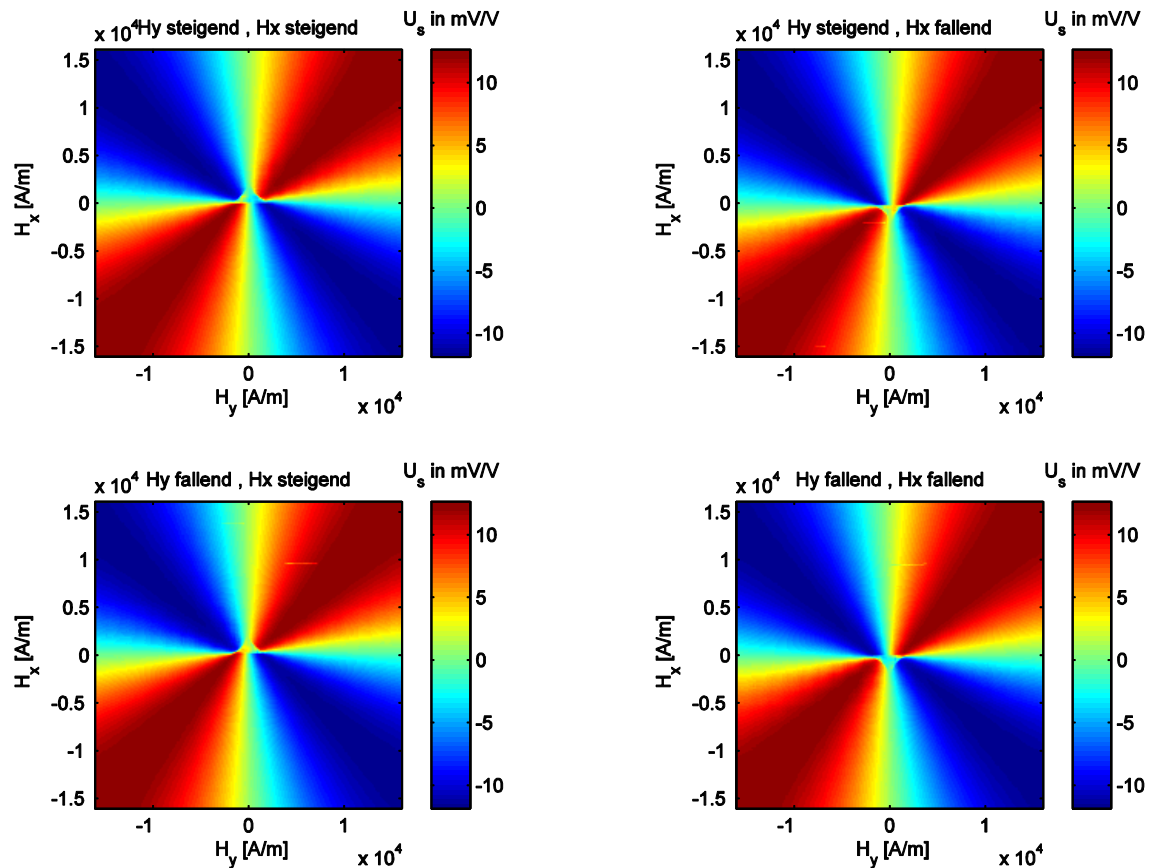
3.12: Ergebnis der Kennfelderfassung mit Dreieckfeld und Überlagerung

Durch die Überlagerung der zwei Messdurchläufe ergibt sich die Form eines Kreuzes. In den grünen Bereichen in den Ecken können keine Messwerte erfasst werden, weil die Spuleninduktivität verhindert, dass dieses Magnetfeld eingestellt werden kann. Jeder Punkt im Kennfeld stellt eine Mittelung der an diesem Punkt über die Perioden der Messung erfassten Ausgangsspannungen dar.

In Kapitel 2.2.2 wurde erläutert, dass ferromagnetische Materialien eine Hysterese aufweisen. Dies wird in dem gezeigten Kennfeld vernachlässigt, da eine Mittelung über die Messwerte an jedem Punkt des Kennfeldes durchgeführt wird. Wenn der dreieckförmige Verlauf der Feldstärken jedoch beachtet wird, können die folgenden vier möglichen Zustände unterschieden werden:

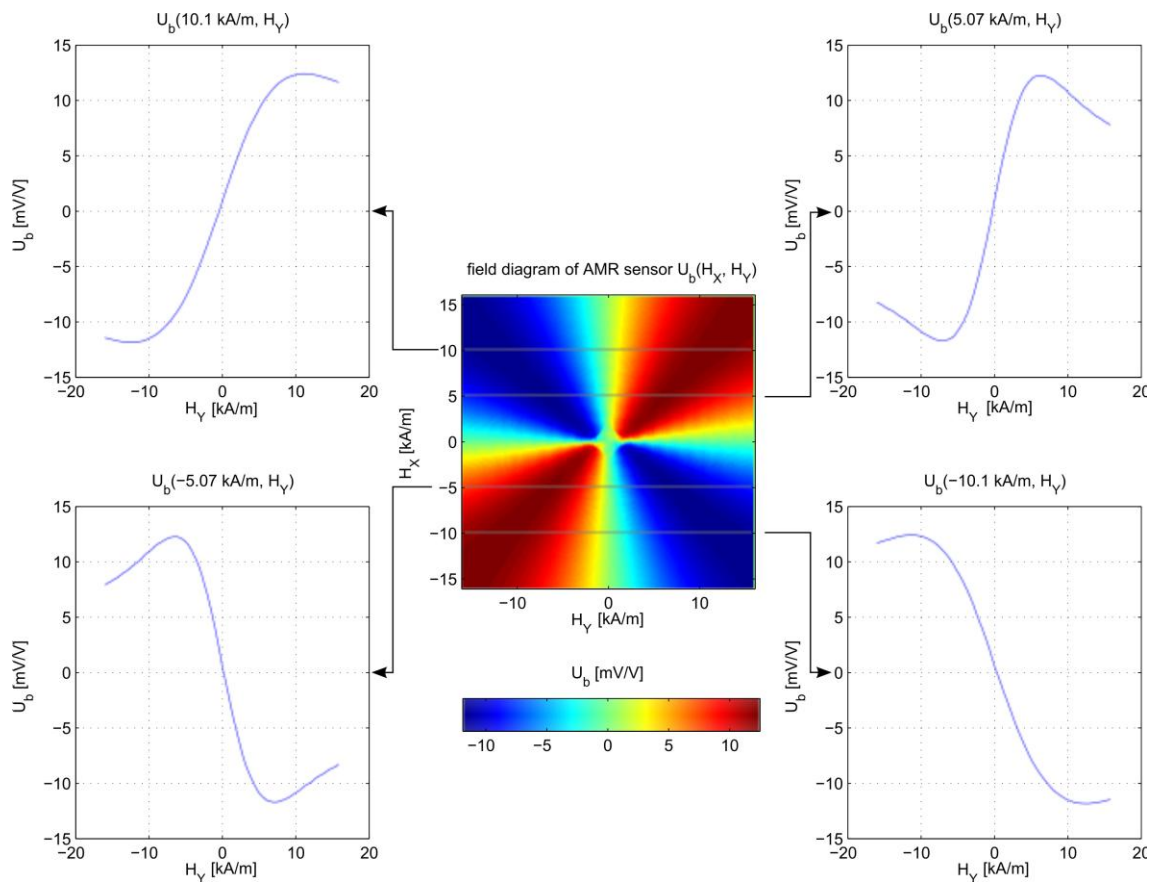
- $H_X$  steigt und  $H_Y$  steigt,
- $H_X$  steigt und  $H_Y$  fällt,
- $H_X$  fällt und  $H_Y$  steigt und
- $H_X$  fällt und  $H_Y$  fällt.

Nach diesen Zuständen sortiert zeigen sich die in Bild 3.13 visualisierten Ergebnisse.



3.13: Ergebnis der Kennfeldmessung sortiert nach den Zuständen des Magnetfeldes

Bei größeren Feldstärkepaaren tritt kaum ein Unterschied in den Ausgangsspannungen bezogen auf den Zustand auf. Allerdings ist bei kleineren Feldstärken, in der Mitte der Kennfelder, ein starker Unterschied zu erkennen. Dies bedeutet, dass ein mit diesem KSpK aufgenommenes Kennfeld in diesem Bereich ungenau sein wird. In diesem Fall sollte auf ein Feld, welches mit dem KSpK „Klein“ aufgenommen wurde zurückgegriffen werden. Denkbar ist zudem die Erstellung einer Kombination aus beiden Kennfeldern. Wird der Mittelwert an jedem Punkt gebildet, ergibt sich das in Bild 3.14 gezeigte finale Kennfeld für diesen Feldstärkebereich.



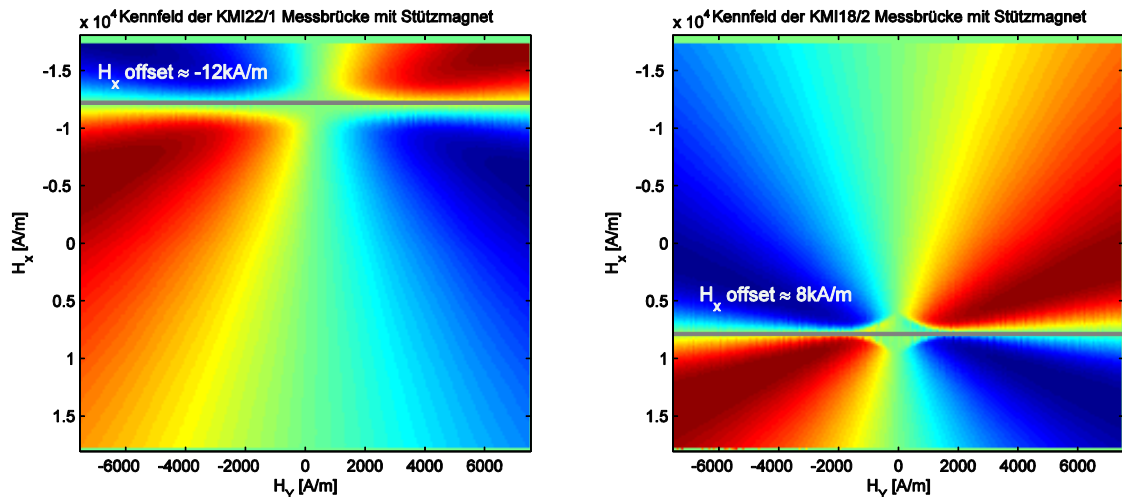
3.14: Ergebnis einer Kennfeldmessung durch Bildung des Mittelwertes an jedem Punkt, nichtlineare Kennlinien sind für konstante gesetzte  $H_X$ -Werte[23]

Nach dem beschriebenen Verfahren wird nicht nur ein Kennfeld erstellt, sondern mehrere in verschiedenen Feldstärkebereichen, damit die Auflösung hier erhöht wird.

### 3.4.2 Kennfelderfassung mit Stützmagnet

Zur Erstellung eines Simulationsmodells aus Sensor und Encoder ist es erforderlich, das System möglichst genau beschreiben zu können. Eine der wichtigsten Eigenschaften ist der Stützmagnet, der am Sensor angebracht ist. Wie bereits in Kapitel 2.5 erläutert, gibt es zwei Arten von Stützmagneten, einen für die Verwendung mit passiven Encodern und einen für die mit aktiven Encodern. Beide Encoder werden in den Kapiteln 4 und 4.3 näher beschrieben. Bei den passiven Encodern besitzt der Magnet zwei Komponenten; eine stärkere in Z-Richtung, die wie beschrieben von dem Sensor nicht erfasst wird, und eine schwächere in X-Richtung. Der Magnet des Sensors für den aktiven Encoder besitzt hingegen nur eine Komponente in X-Richtung. Mit der oben beschriebenen Art der Aufnahme von Kennfeldern ist es möglich, den Feldanteil in X-Richtung zu bestimmen. Erwartungsgemäß verschiebt sich das Kennfeld genau um den Betrag  $H_{x(Mag.)}$ . Zudem zeigt sich, dass die Werte in dem Bereich liegen, der zuvor mit dem Gaussmeter grob gemessen wurde. Die Schwierigkeit, mit dem Gaussmeter in

der richtigen Entfernung über dem Stützmagneten zu messen, damit der gleiche Abstand eingehalten wird, den die magnetoresistive Messbrücke aufweist, wird somit umgangen. Bild 3.15 zeigt die zwei Arten der aufgenommenen Kennfelder. Auf der linken Seite ist das Kennfeld des Sensors für passive Encoder und auf der rechten Seite das für aktive Encoder dargestellt.

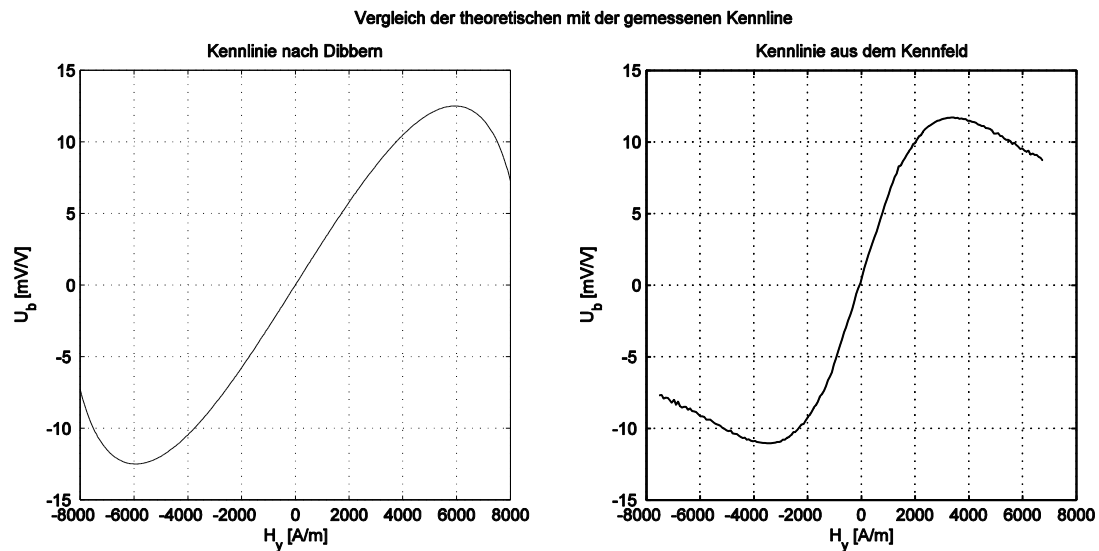


3.15: Kennfelder des AMR-Sensors mit Stützmagneten für passive Encoder (links) und aktive Encoder (rechts) (Offsetlinien zeichnerisch ergänzt)

Deutlich zu erkennen ist, dass das Kennfeld nach unten beziehungsweise nach oben verschoben ist, da die Komponenten der Stützmagneten in X-Richtung in die jeweils andere Richtung zeigen (vgl. Bild 2.17). Die Feldstärken der X-Komponenten betragen  $H_{x,passiv} = -12kA/m$  und  $H_{x,aktiv} = 8kA/m$ . Dabei gibt es eine gewisse Messungenauigkeit, da eine absolut genaue Positionierung der Sensoren im KSpK nicht gewährleistet werden kann. Dies betrifft sowohl die X-Y-Ebene als auch die Höhe und eine eventuelle Verdrehung des Sensors um eine oder mehrere seiner Achsen. Da diese Werte nur einen Startwert bei der Erzeugung eines Modells darstellen, wirkt sich ein Fehler hier nicht stark aus. Ist es nötig, den Stützmagneten genauer zu charakterisieren, muss der Messaufbau hinsichtlich seiner Halterung überarbeitet werden.

### 3.4.3 Verbesserung der Auflösung des Kennfeldes

Die beste Methode, das Kennfeld zu verbessern, ist eben dieses zu berechnen. Dazu ist eine mathematische Beschreibung nötig, für die allerdings lediglich die Theorie nach Dibbern [6] bekannt ist (vgl. Gl. (2.57)). Bild 3.16 zeigt den beispielhaften Vergleich einer berechneten Kennlinie (links) mit einer gemessenen Kennlinie (rechts).



3.16: Beispiel eines Vergleichs der theoretischen Kennlinie nach [6] mit einer im Kreuzspulenkasten gemessenen tatsächlichen Kennlinie

Besonders in den äußeren Bereichen stimmen die Kennlinien nicht genau überein (vgl. Bild 2.13 links). Aus diesem Grund kann ein komplettes Kennfeld, welches nach Gl. (2.57) berechnet wird, nicht verwendet werden. Somit muss auf eine Messung zurückgegriffen werden. Dabei wird nach einer Möglichkeit gesucht, das Kennfeld, das wie oben beschrieben aufgenommen wurde, zu verbessern. Die Auflösung kann durch die Art der Messung beeinflusst werden. Da bekannt ist, dass an dem Sensor ein Stützmagnet angebracht ist, der die oben genannten Stützfelder erzeugt, muss die Feldstärke in X-Richtung nicht für alle Bereiche eingestellt werden. In Y-Richtung, in der der Sensor empfindlich ist, muss hingegen genauer vermessen werden, weil sich die auftretenden Feldstärken in einem großen Bereich befinden. Dies kann erreicht werden, indem für das Dreieck in X-Richtung eine kleinere Amplitude eingestellt wird als für das in Y-Richtung. Daher wird die maximale Aussteuerung des X-Feldes konstant gehalten und muss mindestens die Feldstärke des Stützmagneten erreichen. Im Gegensatz dazu werden mehrere Kennfelder erzeugt, in denen die maximale Y-Aussteuerung jeweils verringert wird. Die erzeugten Kennfelder haben hier jeweils eine Größe von 200x200 Punkten. Wird wie beschrieben verfahren, erhöht sich die Auflösung des  $H_Y$ -Feldes.

An den im ersten Teil dieses Kapitels gezeigten Kennfeldern und an der Form der Kennlinien in Bild 2.13 rechts ist zu erkennen, dass die Kennlinien und somit auch das dazugehörige Kennlinienfeld im Optimalfall punktsymmetrisch sind. Somit können die verschobenen Kennfelder aus Kapitel 3.4.2 dazu verwendet werden, Kennfelder zu erzeugen, die eine höhere Auflösung haben. Dazu muss der Mittelpunkt des Kennfeldes zunächst ermittelt und dann der relevante Teil des Kennfeldes um die horizontale Nulllinie (vgl. Bild 3.15) und um die hier nicht gezeigte vertikale Mittellinie gespiegelt

werden. Dadurch erhält man Kennfelder, die nicht mehr quadratisch, sondern rechteckig sind. Somit ist es möglich, mehrere Kennfelder zu erzeugen, die eine geringe Auflösung in X-Richtung (die Y-Achse der Kennlinienfelder) haben, aber eine hohe Auflösung des Kennfeldes in Y-Richtung.

Um Fehler bei der Spiegelung zu verhindern und die Nutzbarkeit des Kennfeldes zu ermöglichen, ist es für die Erzeugung solcher Kennfelder wichtig, dass der Sensor während der Messung im KSpK nicht verdreht ist. Dabei sind Verdrehungen um einen Winkel von lediglich  $1^\circ$ - $2^\circ$  bereits mit dem Auge erkennbar. Eine zusätzliche Möglichkeit wären zudem so genannte Lupenkennfelder, die erst dann gemessen werden, wenn Simulationsergebnisse vorhanden sind. Folglich könnte für jede dieser Simulationen ein passendes Kennfeld erzeugt werden, welches genau in den erforderlichen Feldstärkegrenzen vermessen wird. Dies würde jedoch einen sehr hohen Aufwand bedeuten. Die Auflösung kann daher nicht beliebig erhöht werden, weswegen hier eine lineare Interpolation zum Einsatz kommt, die von Matlab als Funktion (interp2) zur Verfügung gestellt wird. Die gemessenen Kennfelder werden in Kapitel 6 dazu verwendet, aus den simulierten Feldstärken die Brückenspannung zu berechnen.

Die Firma NXP Semiconductors GmbH hat darauf hingewiesen, dass die Kennfelder der AMR-Widerstände auch berechnet werden können, indem Gl. (2.43) durch zum Beispiel Anwendung des Newtonverfahrens gelöst und das Ergebnis in Gl. (2.31) eingesetzt wird [24]. Eine erste Betrachtung der Rechenergebnisse scheint vielversprechend und sollte daher weiter untersucht werden. Dies konnte bisher aus zeitlichen Gründen keine Berücksichtigung finden.

Damit ist die Sensorcharakteristik hinreichend genau beschrieben. Die Charakterisierung des nächsten Teils des Systems, die verwendeten Encoderräder, folgt in Kapitel 4.



## 4 Charakterisierung von Encoderrädern

In diesem Kapitel werden drei exemplarische Encoderräder vermessen und charakterisiert. Dies ist nötig, da keine Konstruktionszeichnungen oder Spezifikationen der Hersteller zur Verfügung stehen. Die ersten zwei Encoder sind passiv, das heißt sie bestehen aus einem ferromagnetischen, nicht magnetisierten Material. Diese werden geometrisch vermessen. Der dritte Encoder ist im Gegensatz zu den ersten beide aktiv und besteht aus einem magnetisierten Kunststoff. Dieser wird sowohl geometrisch als auch hinsichtlich seiner magnetischen Eigenschaften vermessen.

### 4.1 BMW 3er Encoderrad

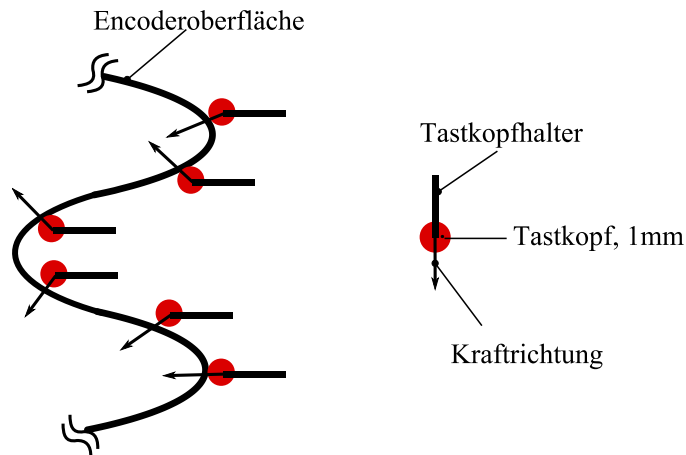
Bei dem BMW 3er Encoderrad handelt es sich um ein passives Encoderrad aus Metall. Die Spezifikation in [9] zeigt ein Encoderrad, welches sich an Bild 2.18 (links) orientiert. Dort ist zu erkennen, dass dieses klare, scharfe Kanten besitzt. Bei dem in Bild 4.1 abgebildeten BMW 3er Encoderrad wird jedoch von dieser Form abgewichen, sodass dieses keine scharfen Kanten, sondern eine glatte Oberfläche aufweist.



4.1: BMW 3er Encoderrad

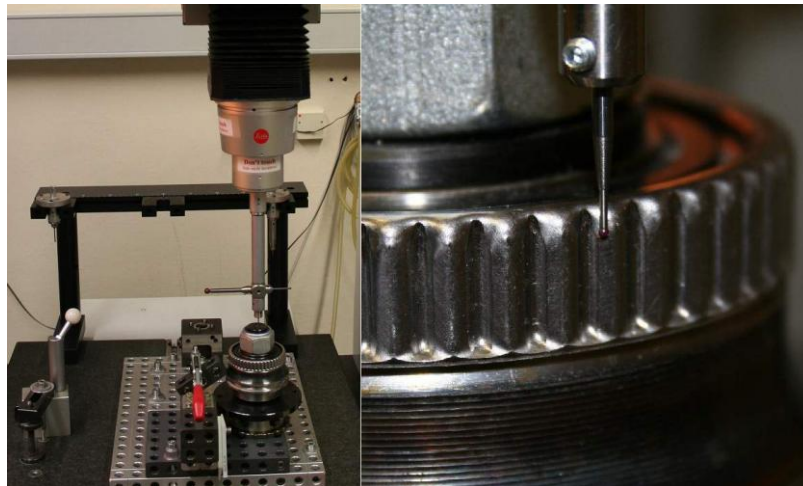
Auf Grund dieser Oberflächenbeschaffenheit ist eine einfache Vermessung mit dem Messschieber ungeeignet, da hiermit nur der äußere Durchmesser des Encoders, nicht aber die Rundung erfasst werden kann. Deshalb wird auf eine technische Vermessung aus dem Maschinenbau zurückgegriffen. Hierbei kommt das Drei-Koordinatenmessgerät Leitz PMM 654 zum Einsatz. Dabei wird das Encoderrad so auf einer

Messplattform befestigt, dass es sich nicht mehr drehen kann. Nachdem das Messgerät kalibriert wurde, wird das Messobjekt zuerst von vier Seiten eingemessen, sodass sich der Koordinatenursprung in der Mitte des Encoders befindet. Dann werden mit einem Tastkopf Messwerte aufgenommen. Zu jeder Position des Tastkopfes werden die Koordinaten gespeichert. Die Messung ist möglich, da der Tastkopf mit einer bestimmten Kraft gegen den Encoder gedrückt wird und an diesem entlanggleitet. Bild 4.2 stellt diesen Vorgang schematisch dar.



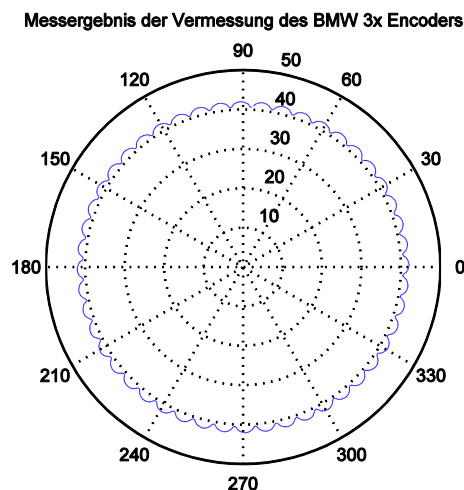
4.2: Messprinzip der Vermessung von Strukturen mit abgerundeten Flanken

Der Tastkopf besteht aus einem kugelförmigen und sehr glatten Rubin, der industriell gefertigt wurde. Die gemessenen Koordinaten geben immer dessen Mittelpunkt an. Aus diesem Grund ist es nötig, einen genügend kleinen Tastkopfdurchmesser zu wählen, dessen Radius kleiner sein muss als der kleinste Radius des zu vermessenden Gegenstandes. Daher kommt ein Tastkopf mit einem Durchmesser von 1mm zum Einsatz. Dies muss später bei der Auswertung der Messwerte berücksichtigt werden, da das tatsächliche Encoderrad um diesen Radius kleiner ist. Bild 4.3 zeigt eine Übersicht über den Messaufbau.



4.3: Übersicht Vermessung des BMW 3er Encoderrades

Die Messung läuft nach einer Parametrierung automatisch ab. Dabei werden zum Beispiel die Auflösung, mit der gemessen werden soll, die Schrittweite und die Geschwindigkeit, mit der verfahren werden soll, eingestellt. Die weiße Kugel links im Bild dient der Kalibrierung des Messgerätes. Im unteren Teil ist das arretierte Encoderrad zu erkennen; von oben ragt der Messarm in das Bild. Die rechte Seite des Bildes zeigt den Tastkopf in vergrößerter Darstellung. Das Encoderrad wird in drei Höhen vermessen, um eine eventuelle Abweichung im Durchmesser zu erkennen. Eine derartige Abweichung kann auftreten, wenn der Encoder eine konische Form aufweist. Auf allen drei Ebenen ist der Außendurchmesser nahezu identisch. Daher wird im Folgenden nur eine Ebene betrachtet. Die Messdaten werden in einer Textdatei zur Verfügung gestellt und können so in Matlab eingelesen und verarbeitet werden. Der Matlab Code dazu befindet sich in Anhang B. Nach dem Einlesen und Umwandeln steht eine Datei im \*.dxf Format zur Verfügung, die direkt in CST importierbar ist. Bild 4.4 zeigt die Formgebung des Encoders in Polardarstellung.



4.4: Messergebnis des BMW 3er Encoderrades in Polarkoordinaten

Zu erkennen ist, dass der Encoder 48 Zähne besitzt. Als weiteres Kriterium der Charakteristik des Encoders ist die Abweichung der Zahnhöhe zu betrachten. Zu ihrer Bestimmung wird die Blockierung des Encoderrades aus Bild 4.3 (links) gelöst und eine Messuhr so platziert, dass diese senkrecht zur Oberfläche des Encoders steht. Dann wird der Encoder Zahn für Zahn weitergedreht und jeder einzelne in seiner Höhe vermessen (vgl. Anhang A). Dabei wird nicht die absolute Höhe gemessen, sondern die relative Höhe der Zähne zueinander. Zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Zahn ergibt sich eine maximale Abweichung von  $0,16\text{mm}$ . Legt man das Datenblatt [15] zu Grunde, wird hier die Spezifikation für Encoderräder eingehalten, da ein maximales Delta von  $0,2\text{mm}$  gefordert ist. Dennoch ist anhand der Messdaten zu erkennen, dass das Encoderrad minimal unrund ist. Da das Material nicht näher bestimmt werden kann, wird hier von Baustahl ST37 ausgegangen.

## 4.2 Golf 4 Encoderrad

Das Golf 4 Encoderrad ist hinsichtlich seines Aussehens stark an das Referenzmodell angelehnt. Aus diesem Grund kann es mit einem einfachen Messschieber mit Nonius vermessen werden. Diese Messung befindet sich bezüglich seiner Genauigkeit im Bereich der Vermessung des BMW 3er Encoders. Bild 4.5 zeigt den Encoder des Golf 4, der insgesamt 43 Zähne besitzt.

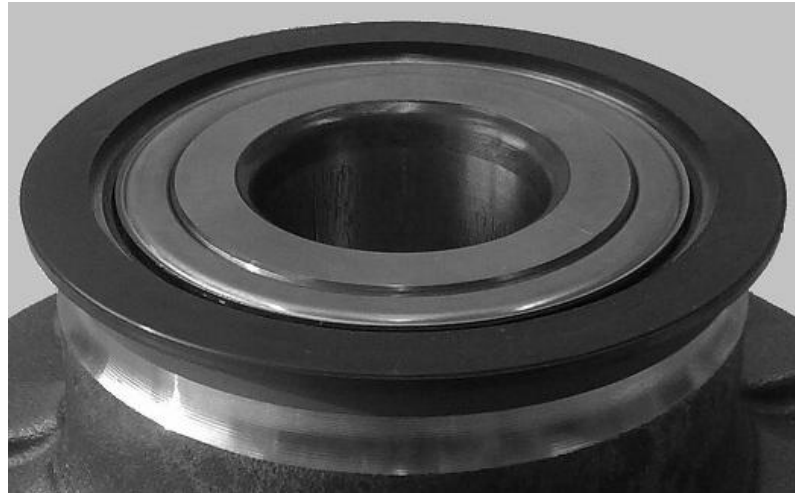


4.5: Golf 4 Encoderrad [16]

Erneut wird die maximale Abweichung zwischen kleinstem und größtem Zahn bestimmt. Dabei ergibt sich ein maximales Delta von  $0,09\text{mm}$  (vgl. Anhang A). Auch dieses Encoderrad erfüllt die Spezifikation nach [15]. Die Breite der Zähne und der Lücken beträgt  $2,7\text{mm}$ , der Außendurchmesser  $73,5\text{mm}$  und der Innendurchmesser  $69,8\text{mm}$ . Für das Material gilt hier dieselbe Annahme wie bei dem BMW 3er Encoderrad.

### 4.3 Vermessung eines aktiven Encoderrades

Bei dem dritten und letzten Encoderrad handelt es sich um ein aktives Encoderrad, das aus dem Golf 5 stammt und aus magnetisiertem Kunststoff besteht. Die Encoderzähne werden hier durch das Magnetfeld erzeugt. Das folgende Bild zeigt dieses Encoderrad.



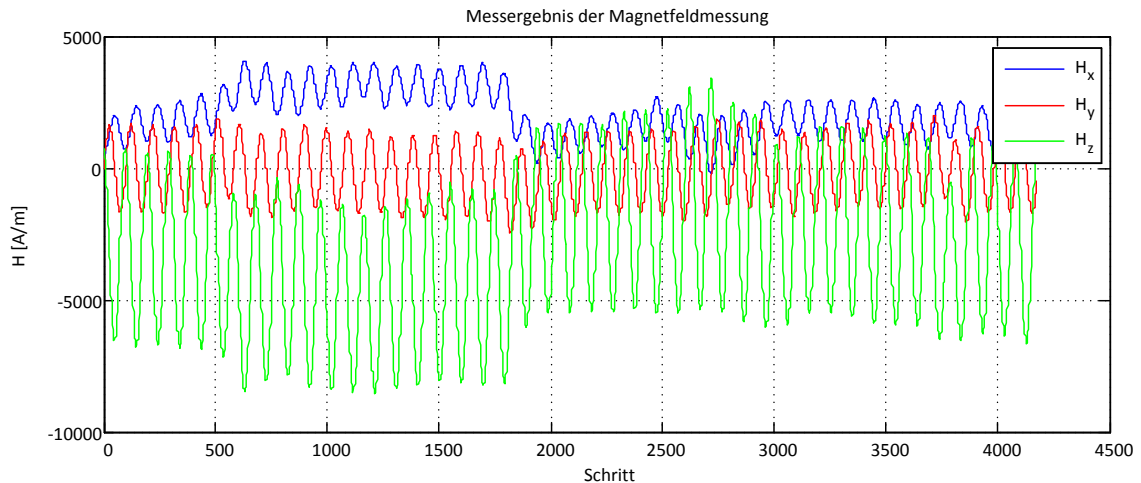
4.6: Golf 5 Encoderrad

#### 4.3.1 Magnetfeldmessung mit einer 1D-Hallsonde

Für eine Charakterisierung des Encoderrades sind die einzelnen Komponenten des Magnetfeldes von Bedeutung. Sind alle drei bekannt, ist die Bestimmung der Magnetisierung der Magneten erfolgt. Eine erste Vermessung wird mit dem Gaussmeter FH55 durchgeführt. Dazu wird die Messsonde zunächst direkt auf das Encoderrad aufgelegt, um die Feldstärke  $H_z$  zu messen. Danach wird die Sonde um einen Winkel von  $90^\circ$  um die lange Achse gedreht, um das Magnetfeld  $H_y$  zu messen. Als letztes wird die Sonde so positioniert, dass diese orthogonal zum Radius steht und mittig auf der Encoderfläche liegt, um das Feld  $H_x$  zu messen. Bei der Bezeichnung der Richtungen der Felder wird das Koordinatensystem des Sensors verwendet, damit später eine einfachere Modellierung stattfinden kann (vgl. Bild 5.14).

Das erste vermessene Encoderrad wurde bei der Montage auf den Radmessplatz bereits bei vorhergehenden Abschlussarbeiten leicht beschädigt. Dennoch kann es zur Gewinnung von Messergebnissen herangezogen werden. Dies wird in [16] durchgeführt. Die Messwertaufnahme wird mit einem PC durchgeführt, der zum einen den Schrittmotor steuert, der dazu genutzt wird, das Encoderrad schrittweise zu drehen, und zum anderen die Messwerte des Gaussmeters ausliest. Bild 4.7 zeigt das Ergebnis der beschriebenen Messung. Bei dieser wird nach jeweils einer Schrittweite von 0,05mm ein Messwert aufgenommen. Dabei wird nicht nur eine, sondern 1,25 Umdrehungen vermessen, damit sichergestellt ist, dass der Anfang und das Ende gut getroffen werden

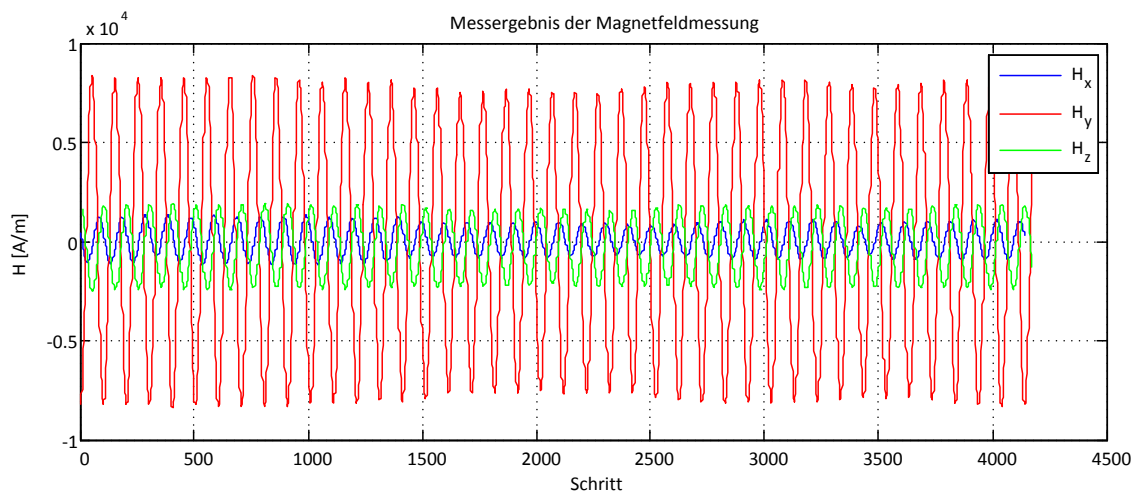
und die Periodizität nach einem Umlauf des Encoderrades zu erkennen ist. Nachdem die Periode gefunden ist, kann die „Zähnezahl“ gezählt werden. Hier sind es 43 magnetische Plus- beziehungsweise Minuspole. Zur Vereinfachung wird ein Pluspol im folgenden als Zahn bezeichnet.



4.7: Messergebnis der Feldstärkenbestimmung des Golf 5 Encoder (beschädigt),  
Sonde in Z-Richtung noch nicht in korrekter Lage

Im Bild ist zu erkennen, dass die Feldstärken über dem Encoder nicht gleichmäßig verlaufen. Stattdessen gibt es einen Abschnitt, in dem die Feldstärken von ihrem mittleren Verlauf abweichen und die Feldkomponenten ein starkes Offset bekommen. Am stärksten ist das Magnetfeld in Z-Richtung, gefolgt von der Y- und der X-Komponente, die am kleinsten ist. Die Messung bedarf allerdings einer Verbesserung, da die Hallsonde bei der Vermessung, auch nach der Verkipfung zur Messung der anderen Feldanteile, direkt auf dem Encoder aufliegt. Da die Form und Größe des Hallsensors innerhalb der Sonde bisher vernachlässigt wurden, sind nur die Feldstärken  $H_x$  und  $H_y$  hinsichtlich ihrer Amplitude miteinander vergleichbar. Aus diesem Grund muss das Verfahren verbessert und die Messung wiederholt werden. Allerdings kommt hier ein fabrikneuer Encoder zum Einsatz.

Bei diesem Durchgang wird die Sonde bei der Messung von  $H_z$  2mm oberhalb des Encoders platziert. Dies entspricht der Höhe des Hallsensors bei verkippter Sonde. Somit sind die Amplituden der Felder in allen Richtungen miteinander vergleichbar. Ein erhebliches Problem stellt die Positionierung der Sonde bei der Messung dar, da es nicht möglich ist, mit allen Komponenten denselben Startpunkt zu finden. Hier kann eine geschätzte Abweichung von einigen Schritten auftreten. Bild 4.8 zeigt das Ergebnis der Messung.



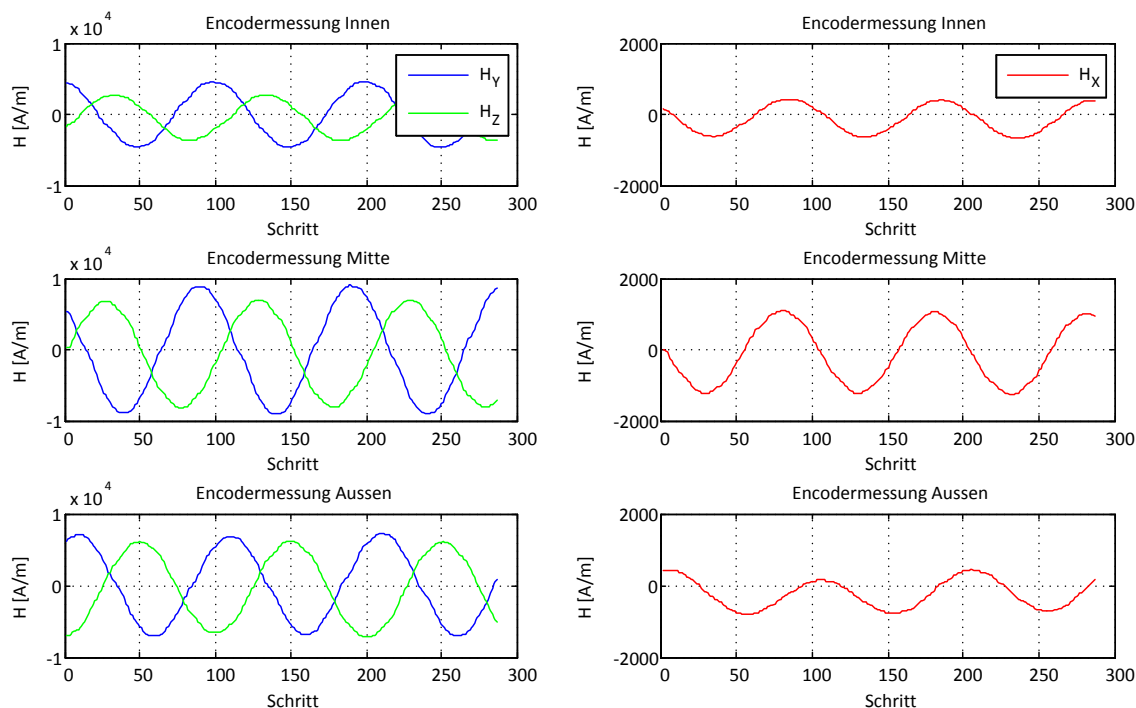
4.8: Messergebnis der Feldstärkenbestimmung des Golf 5 Encoder (neu),  
Abweichungen der Phasenbeziehung auf Grund des Messverfahrens wahrscheinlich

Die stärkste Feldkomponente ist erwartungsgemäß nun  $H_Y$ , da der ABS-Sensor wie beschrieben dieser gegenüber sensibel ist. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Felder keinen beziehungsweise nur einen sehr geringen Offset haben und keinen größeren Schwankungen der Amplitude unterliegen. Die durchschnittliche Amplitude der Feldstärke  $\widehat{H}_Y$  beträgt  $7900A/m$ , die in Z-Richtung  $2000A/m$  und die in X-Richtung  $1100A/m$ . Dennoch fällt der starke Unterschied der Feldstärkenamplituden auf. Eine Ursache für diese Abweichung kann eine Richtungsabhängigkeit der verwendeten Messsonde sein. Aus diesem Grund und zur besseren Vermessung der Phasenbeziehungen zwischen den Komponenten muss das Verfahren erneut verbessert werden, indem auf eine 3D-Hallsonde zurückgegriffen wird.

### 4.3.2 Magnetfeldmessung mit einer 3D-Hallsonde

Das Problem der Positionierung der Sonde nach dem Verkippen kann dadurch vermieden werden, dass eine Sonde verwendet wird, die in drei Raumrichtungen gleichzeitig misst. Ein solches Gerät wurde von der Firma NXP Semiconductors GmbH zur Verfügung gestellt. Bei der Interpretation der Messwerte ist hier zu beachten, dass die drei Hallsensoren nicht auf exakt demselben Punkt innerhalb der Sonde platziert werden können. Dies bedeutet, dass eine Messung nur dann exakt ist, wenn der Feldstärkenverlauf einen niedrigen räumlichen Gradienten aufweist. Da das Feld nun genauer bestimmt werden kann, soll der Encoder in den drei Spuren „Innen“, „Mitte“ und „Außen“ vermessen werden. Auch hier ist das Ziel, eine möglichst gute Abschätzung darüber zu bekommen, wie die Feldverteilung über dem Rad ist, um eine Vergleichbarkeit zu der ersten Messung herzustellen und damit später eine Modellierung in CST durchzuführen. Das Ergebnis kann in Anhang A Bild A 1 eingesehen werden. Es stimmt quantitativ mit dem Messergebnis aus Bild 4.8 überein.

Um eine möglichst genaue Aussage über die Amplitude zu erhalten, sollen drei der 43 Zähne genauer vermessen werden, das heißt circa 1/14 des Gesamtumfangs. Bild 4.9 zeigt die grafische Darstellung der drei Messungen.



4.9: Ergebnis der Encodervermessung mit einem 3D-Gaussmeter, drei Zähne in hoher Auflösung

Zu erkennen ist, dass die Position des Sensors über dem Encoderrad eine Auswirkung auf das Ausgangssignal haben muss, da die Magnetfeldstärken von außen nach innen abnehmen. Es wird davon ausgegangen, dass der Sensor später mittig über dem Encoder platziert wird. Daher werden die Feldstärken dieser Messung genauer betrachtet. Die Amplituden der Magnetfelder betragen bei einem Abstand von 2mm  $\hat{H}_X \approx 1100A/m$ ,  $\hat{H}_Y \approx 8900A/m$  und  $\hat{H}_Z \approx 7500A/m$ .

#### 4.4 Zusammenfassung

Alle vorliegenden Encoderräder wurden hinreichend genau vermessen. Dabei können die gewonnenen Daten der mechanischen Vermessungen in Kapitel 5.2 direkt verwendet werden. Für die Daten des BMW 3er Encoderrades gilt, dass hier noch eine Verfeinerung der Umrechnung der Messwerte des beschriebenen Messgerätes erfolgen können, sofern dies nötig wird. Derzeit werden die um den Radius korrigierten Koordinaten berechnet, indem zunächst der Betrag an jedem Punkt gebildet und dieser danach um den Radius reduziert wird. Zur vereinfachten Umsetzung wird der Radius hierbei in Richtung des Encodermittelpunktes von den Messwerten abgezogen.



Korrekterweise müsste dieser jedoch in Richtung der Kraft, mit der der Tastkopf gegen den Encoder drückt, abgezogen werden. Eine bessere Methode ist es daher, immer die Nachbarpunkte zu betrachten und die Steigung zwischen den Punkten dazu zu nutzen, um die Richtung, in die der Radius abgezogen werden muss, zu bestimmen. Dies wird so bisher noch nicht umgesetzt. Eine genauere Vermessung des Golf 4 Encoderrades könnte beispielsweise mit einer Lasertriangulation durchgeführt werden.

Vergleicht man die Messergebnisse der drei Vermessungen der aktiven Encoderräder, sind starke Abweichungen bezüglich der Feldstärken festzustellen. Aus diesem Grund können die gewonnenen Daten nur einen Startwert für die Erstellung des Modells sein. Eine Vermessung mit Labormitteln ist hier kritisch zu bewerten. Hinsichtlich einer Bestimmung der Sensorstützmagneten ist anzumerken, dass schon bei der deutlich größeren Struktur des Encoderrades die beschriebenen Abweichungen auftreten und daher eine Vermessung dieser um circa eine Größenordnung kleineren Struktur als unsicher einzustufen ist, da eine punktförmige Messung in alle Raumrichtungen hier nicht möglich ist. Aus den genannten Gründen ist ein Bemühen um die Konstruktionsdaten der Encoderhersteller von Vorteil.

## 5 Magnetostatische Simulation mit der Software CST EM Studio

Das Messprinzip des Sensor-Encoder-Systems basiert auf der Messung der Änderung eines Magnetfeldes. In Kapitel 2.5 wurde dieses Verfahren eingehend vorgestellt. Zur Veranschaulichung zeigte Bild 2.19 das Brückenausgangssignal bei verschiedenen Encoderradstellungen im Falle eines passiven Encoders. Der Ansatz, auf dem die Simulation basiert, ist die Berechnung der Magnetfeldstärke jedes einzelnen Brückenwiderstandes bei unterschiedlichen Drehwinkeln. Das Ergebnis jedes Simulationsschrittes ist das Feldstärkenpaar  $H_{x,n}$  und  $H_{y,n}$  mit der Nummer  $n$  des Simulationsschrittes. Diese Feldstärken werden in Verbindung mit den gezeigten Sensorkennfeldern dazu genutzt, die Brückenspannung zu synthetisieren.

In Kapitel 3.2 wird das CST EM Studio dazu verwendet, den KSpK zu charakterisieren. Zum besseren Verständnis soll an dieser Stelle ein Einblick in die Funktionsweise dieser Software gegeben werden. Eine Berechnung des Magnetfeldes erfolgt in CST stets nach der Finiten Elemente Methode. Hierbei werden die Maxwell'schen Gleichungen entlang eines dreidimensionalen Netzes, dem Mesh, mehrmals durch eine Näherung gelöst [21]. Um eine Simulation durchführen zu können, werden zunächst Modelle der Encoderräder und des Sensors in der Simulationsumgebung erstellt. In der genannten Software werden dreidimensionale Strukturen zum Beispiel mit Hilfe von Basiselementen wie dem Würfel oder der Kugel erzeugt. Indem ein Vektor der Magnetisierung vorgegeben wird, besteht in dem Paket EM Studio die Möglichkeit, Strukturen zu magnetisieren. Eine einfache Möglichkeit zur Änderung von Modellen kann mit Hilfe von Parametern erfolgen. Diese können für sämtliche eingegebenen Eigenschaften hinterlegt werden. So ist es zum Beispiel möglich, der Höhe eines Zylinders den Parameter „h“ zuzuordnen und dafür dann einen Wert, beispielsweise 5mm, zu hinterlegen.

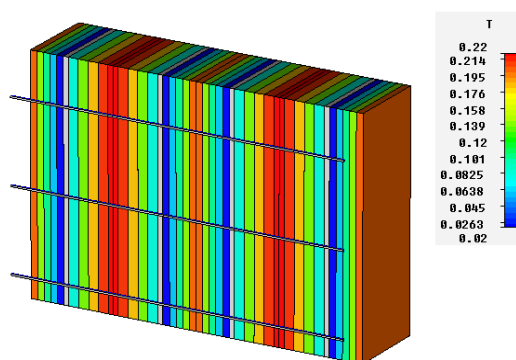
Eine weitere Möglichkeit der Berechnung gewünschter Informationen bietet das so genannte Template Based Postprocessing. Hiermit kann unter anderem die Feldstärke an einem Punkt im Raum aus den Felddaten extrahiert oder der Mittelwert der Feldstärke auf einer gewählten Fläche bestimmt werden. Die resultierenden Ergebnisse können im Anschluss an die Berechnung in einer Textdatei gespeichert und gesondert ausgewertet werden. Ferner ist es möglich, Macros, mit denen die Software gesteuert werden kann, in Visual Basic for Applications (VBA) zu erstellen. Hiermit können

wiederkehrende Aufgaben wie das Einstellen einer Feldstärke in verschiedenen Strukturen automatisiert erfolgen.

Bevor eine Simulation durchgeführt wird, ist zunächst die Umgebung, in der sich das zu simulierende Modell befindet, zu definieren. Dabei werden Einstellungen wie die Definition des Hintergrundmaterials sowie des Bereiches, in dem sich das Modell befindet, eingegeben. Für ersteres ist „normal“ zu wählen; letzterer wird mit 2cm nach allen Seiten definiert. Ein weiterer wichtiger einzustellender Parameter ist die Größe beziehungsweise Feinheit des Mesh. Je kleiner der Abstand zwischen zwei Knotenpunkten ist, desto größer ist die Auflösung, mit der das Feld berechnet wird. Ein wichtiger Grundsatz für eine Modellierung von Systemen aus mehreren Komponenten ist, immer das richtige Bezugskordinatensystem zu verwenden. Bereits bei Erstellung der Modelle der Teilkomponenten sollte dies mitberücksichtigt werden, da hierdurch eine spätere Auswertung stark vereinfacht wird. Das Bezugskordinatensystem, das in [11] beschrieben wurde, wird in Kapitel 5.4 im Rahmen der Erzeugung des Gesamtmodells dargestellt.

## 5.1 Modellierung eines aktiven Encoderrades

Da die Feldverteilung des Encoderrades durch die Messungen bereits bestimmt worden ist, wird diese dazu genutzt, das Modell zu erstellen. Dafür werden in einem ersten Ansatz viele kleine Magnetscheiben aneinander gelegt, um hierüber einen sinusförmigen Verlauf (vgl. Bild 4.9) zu erzeugen. Bild 5.1 zeigt dieses Magnetscheiben-Modell.



5.1: Magnetscheiben-Modell zum Nachbilden eines Sinusverlaufes

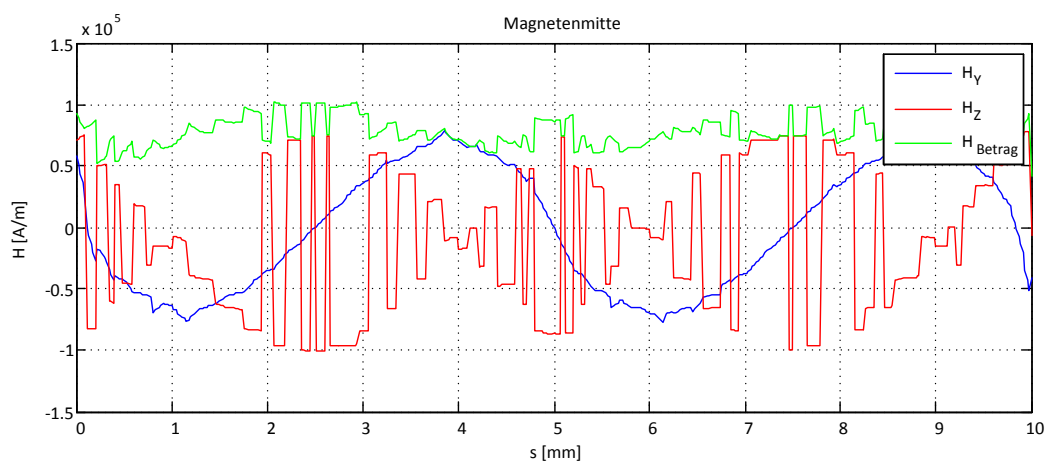
Im Modell sind die einzelnen Magnetscheiben zu erkennen. Die Farbskala spiegelt die Magnetisierungsstärke der jeweiligen Scheibe wieder. Der Magnetisierungsvektor zeigt bei den zwei breiteren tiefroten Bereichen in Richtung des Betrachters. Bei dem tiefroten Bereich in der Mitte des Modells zeigt dieser in die entgegengesetzte Richtung. Dies ist der Fall, da für die Magnetfeldstärke die Sinusfunktion zugrunde gelegt wird.

Hierbei wird ein Permanentmagnet, der aus Nord- und Südpolscheiben besteht, in 22 Teile zerlegt. Betrachtet man den Encoderwinkel, gilt für den Abstand von einem Zahn zum nächsten  $22 \cong 2\pi$ . Somit ergibt sich für die Magnetisierung einer Scheibe

$$B_n = B_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot n}{N}\right) \quad (5.1)$$

mit der Anzahl der Unterteilungen  $N$ , der Nummer der aktuellen Scheibe  $n$  und der maximal einzustellenden Magnetisierungsstärke  $B_0$ . Dabei ist darauf zu achten, dass bei einer Aneinanderreihung mehrerer Magneten, das heißt mehrerer Sinusverläufe, zwischen diesen nicht zweimal nacheinander die Magnetisierung  $B_n = 0$  auftreten darf.

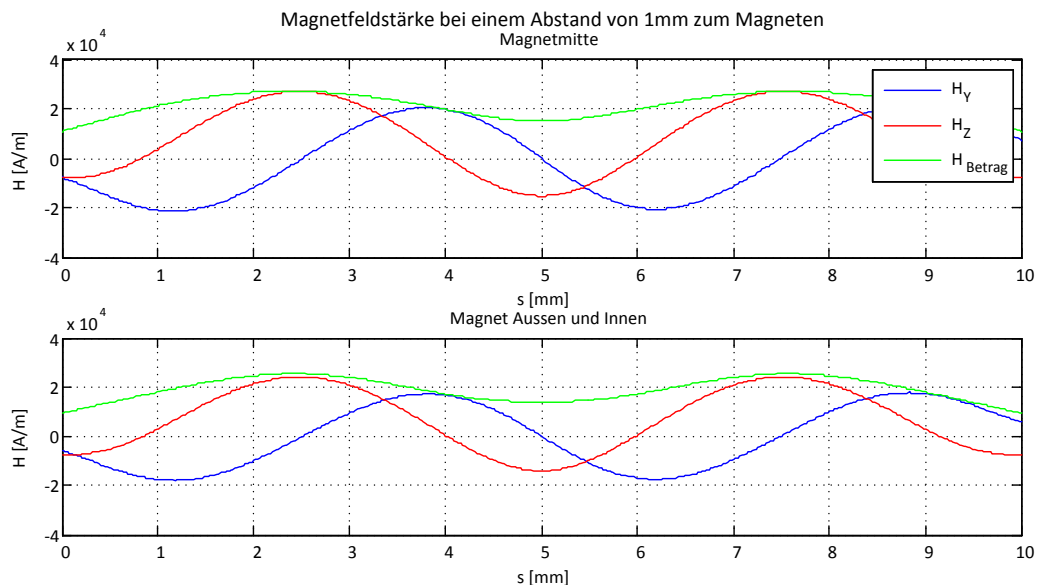
Das gezeigte Modell ist so konstruiert, dass von einem Zahn zum nächsten simuliert werden kann. In diesem Bereich werden alle Magnetfeldzustände, die auf den Sensor auftreffen können, erzeugt. Auf diese Weise ist es nicht nötig, das gesamte Encoderrad mit 43 Zähnen zu simulieren. Über den Magneten in Bild 5.1 sind drei linienförmige Strukturen zu erkennen. Dabei handelt es sich in CST um so genannte Kurven, welche nach der Simulation dazu dienen, den Magnetfeldverlauf an diesen Stellen zu errechnen. Die Bezeichnung „Kurve“ gibt in diesem Fall keinen Aufschluss über die Form, da es sich im vorliegenden Beispiel tatsächlich um eine Gerade handelt. Um das Magnetfeld entlang einer solchen Kurve korrekt zu simulieren, muss eine Struktur um diese erzeugt werden, damit das Mesh entlang der Kurve fein genug ist. Wird dies nicht beachtet, erhält man ein Ergebnis, welches stark von dem tatsächlichen abweichen kann. Nun wird die Magnetfeldstärke entlang dieser Kurven für die Y- und Z-Komponente sowie der Betrag des Feldes an jedem Punkt betrachtet. Bild 5.2 zeigt das Ergebnis der Auswertung der Simulation des Modells aus Bild 5.1.



5.2: Simulationsergebnis des Magnetscheiben-Modells, Magnetfeld direkt auf dem Magneten

Das Magnetfeld  $H_Y$  zeigt im Bereich  $s = 2,5\text{mm}$  bis  $s = 7,5\text{mm}$  erwartungsgemäß einen annähernd sinusförmigen Verlauf. Der Betrag des Magnetfeldes und  $H_Z$  zeigen hingegen einen unerwarteten Verlauf. Laut Softwarehersteller kann es sich hierbei um Singularitäten in der Feldberechnung handeln. Der Verfasser dieser Arbeit vermutet, dass diese auftreten können, wenn bei einer Berechnung durch sehr kleine Zahlen geteilt wird (Division durch Null). Da schon das Magnetfeld über der Mitte des Magneten keine hinreichenden Ergebnisse liefert, werden die Magnetfelder an den Rändern nicht betrachtet. Damit ist eine Magnetmodellierung, die die absolute Höhe Null über den Magneten nutzt, ausgeschlossen.

Da vermutet wird, dass der Raum zwischen dem Magneten und der Messkurve diese Singularität verhindert, soll nun das Magnetfeld in einem Abstand von 1mm zum Magneten ausgewertet werden. Bild 5.3 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung.

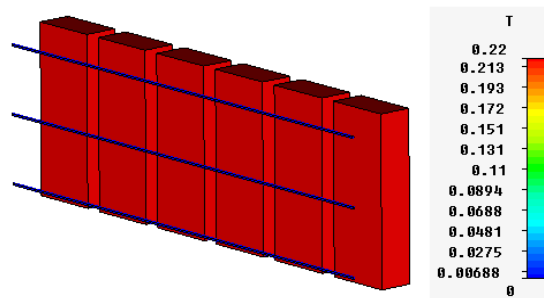


5.3: Simulationsergebnis des Magnetscheiben-Modells, Magnetfeld in einer Höhe von 1mm über dem Magneten

Ein Abstand zwischen Magnet und einem Objekt, auf das das Feld des Magneten wirkt, behebt das Problem der Singularität. Im oberen Graphen sind erneut die Feldstärken über der Mitte des Magneten dargestellt. Zu erkennen ist, dass nun alle Verläufe eine Sinusform aufweisen. Bei genauer Betrachtung der Kurve von  $H_Y$  ist jedoch festzustellen, dass die Spitzenwerte nicht konstant sind, sondern mit zunehmenden  $s$  um etwa  $1000\text{A/m}$  steigen. Weiterhin ersichtlich ist, dass  $H_Z$  ein Offset besitzt. Da dieses Ergebnis darauf schließen lässt, dass weitere Erkenntnisse gewonnen werden können, werden zudem die Feldstärken an den Rändern des Magneten betrachtet. Diese sind in Bild 5.1 durch die obere und untere Linie angedeutet. In Bild 5.3 unten sind diese mit „Innen“ und „Aussen“ bezeichnet. Laut Auswertung sind die Feldstärken an den

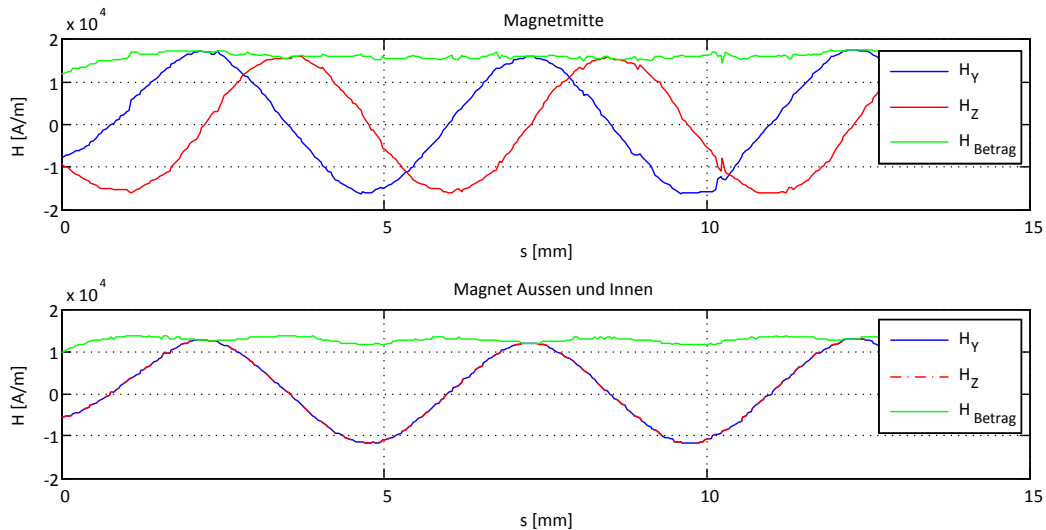
Rändern etwa gleich stark wie die Feldstärke in der Mitte. Da die Felder „Innen“ und „Aussen“ exakt gleich sind, sind nur die Felder der Außenkurve dargestellt.

Die Messungen in Kapitel 4.3.2 haben ergeben, dass die Feldstärkenverteilung nicht wie simuliert gleich ist, sondern am inneren Rand kleiner als am äußeren ist. Dies bedeutet, dass ein gerades Magnetmodell für eine Simulation über die Breite des Encoders nicht geeignet ist. Da die AMR-Messbrücke eine Ausdehnung sowohl in X- als auch in Y-Richtung besitzt (vgl. Bild 2.17), muss die Bedingung des richtigen Feldverlaufs (unterschiedliche Feldstärken innen und außen) über die Encoderbreite erfüllt sein, um eine Simulation des Sensor-Encoder-Systems durchführen zu können. Die Magnetfeldstärkenamplitude muss zudem von Zahn zu Zahn konstant bleiben. Dies ist hier, wie beschrieben, ebenfalls nicht erfüllt. Eine wichtige Erkenntnis kann aus diesem ersten Modell dennoch gewonnen werden. Festgestellt werden kann, dass ein Abstand zwischen Magnet und messendem Objekt, das Magnetfeld sozusagen abrundet. Darauf basierend kann ein weiteres Modell erzeugt werden, in dem im Gegensatz zu dem ersten nur jeweils zwei geometrisch gleiche, magnetisch antiparallele Objekte je Magnet erstellt und dann nebeneinander platziert werden. Dem liegt die Vermutung zu Grunde, dass auch hier wieder derselbe Effekt des Abrundens wie im ersten Modell auftritt, in dem ein Abstand, zum einen zwischen den Magneteilen und zum anderen zwischen Magnet und messendem Objekt, eingehalten wird. Bild 5.4 zeigt dieses vereinfachte Modell mit je einer Nord- und einer Südpolgeometrie.



5.4: Magnetmodell mit weniger Scheiben

Die Rahmenbedingungen der Simulation wurden nicht verändert. Die Auswertung des Magnetfeldes über der Modellmitte ist in Bild 5.5 oben dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich eine Sinusform ergibt. Auch an den Magnetändern ergibt sich ein Feldverlauf, der dem des ersten Modells entspricht. Somit kann der Simulationsaufwand durch dieses vereinfachte Modell reduziert werden, da nur noch zwei Strukturen je Magnet erstellt werden müssen.



5.5: Simulationsergebnis des Magnetscheiben-Modells mit weniger Scheiben

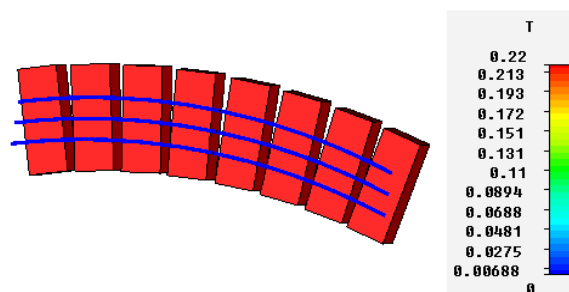
In Bild 5.5 unten ist festzustellen, dass das Feld in der Mitte verrauscht erscheint. Dies lässt sich vermutlich auf Berechnungseffekte zurückführen, da die Auswertung genau über der geometrischen Mitte der Magnetteile erfolgt ist. Die Amplituden der Feldkomponenten  $H_Y$  und  $H_Z$  sind gleich hoch und um circa  $90^\circ$  zueinander phasenverschoben. An den Außenrändern ist allerdings keine Phase zwischen den Komponenten festzustellen. Wichtig ist, dass zwischen dem Feld  $H_{Y,Mitte}$  und den Feldern  $H_{Y,Innen}$  und  $H_{Y,Aussen}$  keine Phase auftritt. Dies ist deshalb von Bedeutung, da die auszuwertenden Feldkomponenten hauptsächlich die der Y- und der X-Richtung sind, welche der Sensor misst. Das Modell muss dennoch angepasst werden, da die Feldstärken „Innen“ und „Aussen“ weiterhin gleich sind. Eine Anpassung kann zum Beispiel dadurch erfolgen, dass die Magneten nicht nur in der horizontalen, sondern auch in der vertikalen Richtung aufgeteilt werden. Ein Test dessen ergibt, dass hierdurch keine nennenswerte Verbesserung des Sachverhalts zu erzielen ist und sich dadurch zudem die Simulationszeit erhöht. Das in Bild 4.6 abgebildete reale Encoderrad weist von oben betrachtet eine Kreisform auf, die bisher auf Grund der Vereinfachung des Modells jedoch außer Acht gelassen wurde. Daher soll das kreisförmige Encoderradmodell im folgenden Abschnitt eingeführt werden.

### 5.1.1 Kreisförmiges Encoderradmodell mit rechteckigen Magneten

Ein Modell sollte möglichst nahe an die Realität angelehnt, trotzdem so grob wie möglich und so genau wie nötig sein, um eine Balance zwischen der Genauigkeit und der Simulationsdauer zu erzielen. Wie gezeigt wurde, kann mit wenigen magnetisierten Strukturen ein sinusförmiger Verlauf des Magnetfeldes erzeugt werden. Um eine Krümmung der Magneten zu erzeugen, muss der Innenradius, der zwischen dem Mittelpunkt des Encoderrades und der Innenkante des magnetisierten Kunststoffes liegt,

in das Modell eingebracht werden. Bisher wurde die Auswertung des Magnetfeldes jeweils entlang der gezeigten Kurvenverläufe durchgeführt. Dies ist ohne weitere Umrechnung der Simulationsergebnisse allerdings nur dann zulässig, wenn keine Krümmung im Modell auftritt und die Kanten des Modells jeweils parallel zu den Achsen des Bezugskoordinatensystems verlaufen, da sich die Winkel stets auf diesen Nullpunkt beziehen. Wird dies nicht beachtet, führt dies zu einem falschen Ergebnis. Wird das Modell hingegen so aufgebaut, dass die Encoderradmitte dem Ursprung entspricht, kann auf Grund dieser Kenntnis zum Erhalt des richtigen Ergebnisses eine Koordinatentransformation durchgeführt werden. Wird das Modell nicht auf diese Weise erstellt, so kann die Berechnung des Ergebnisses nur schrittweise geschehen, indem das Encoderrad um einen bestimmten Winkel pro Berechnungspunkt weiter gedreht wird. Damit bleibt der Bezugspunkt für die Auswertung immer derselbe. Allerdings dreht sich das Modell unter diesem weiter, was mit dem so genannten Parameter Sweep erreicht werden kann. Hier kann eingestellt werden, dass ein bestimmter Parameter mehrmals variiert wird und dazu jeweils die Felder berechnet werden. Dazu müssen die Postprocessing Templates vorhanden sein, da für jeden einzelnen Schritt eine neue Simulation stattfindet und die Felddaten im Gegensatz zu den Ergebnissen aus einem Template nicht gespeichert werden.

Für eine einfache Modellierung einer verschiedenen Anzahl von Magneten innerhalb eines Encoders, aber auch zum einfachen Einstellen verschiedener Magnetfeldstärken wurde ein Macro erstellt, welches in Anhang C gefunden werden kann. Wird das Macro ausgeführt, erscheint eine grafische Oberfläche, in der alle relevanten Daten wie beispielsweise der Radius, die Anzahl der Magneten und die geometrischen Eigenschaften jedes Teilmagneten eingegeben werden können. Nach Bestätigung der Eingaben wird automatisch das gewünschte Encoderrad beziehungsweise ein Ausschnitt dessen eingefügt. Bild 5.6 zeigt einen solchen Ausschnitt.

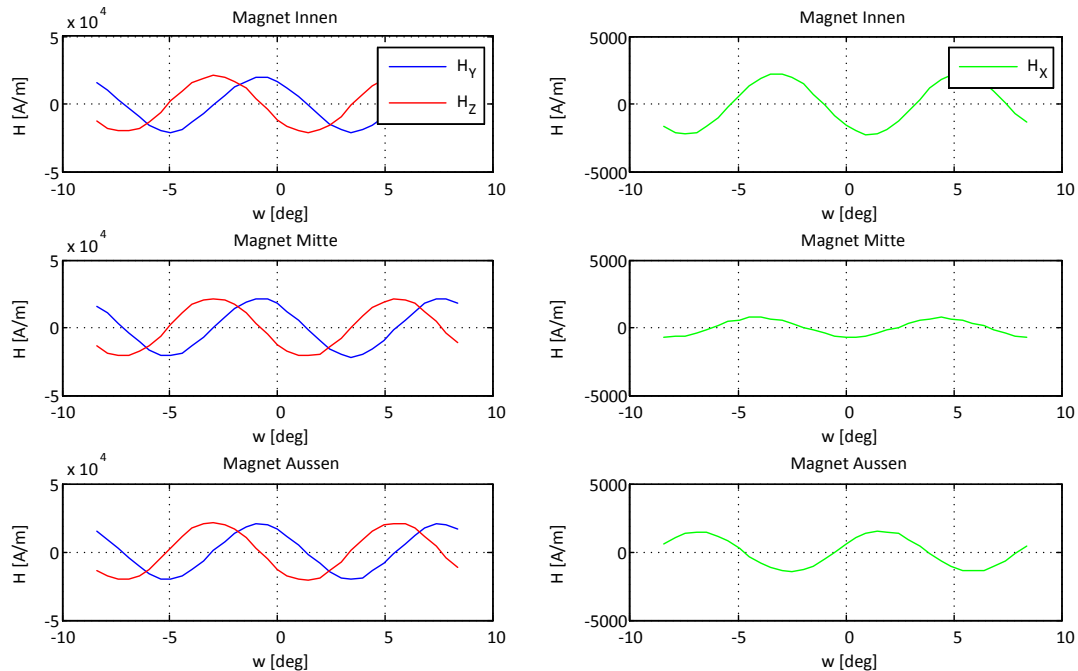


5.6: Magnetmodell mit kreisförmig angeordneten Magneten

Dieser Ausschnitt soll nun hinsichtlich seiner magnetischen Eigenschaften untersucht werden. Dazu wird, wie beschrieben, ein Parameter Sweep durchgeführt. Hierbei werden zwei Magneten an den Auswertepunkten vorbeigedreht. Diese Verdrehung ist in



35 Schritte eingeteilt, um eine genügend hohe Auflösung zu erhalten. Damit können auch Störungen auf dem Magnetfeld bemerkt werden. Bild 5.7 liefert die entsprechenden Simulationsergebnisse in grafischer Darstellung.



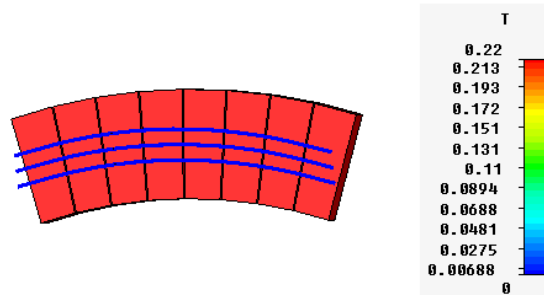
5.7: Simulationsergebnisse kreisförmige Rechteckmagneten

Wertet man die Bild 5.7 zu Grunde liegen Daten aus, so ist festzustellen, dass die Feldkomponenten  $H_Y$  und  $H_Z$  überall die gleiche Phase und annähernd eine gleichbleibende Amplitude haben. Bei  $H_X$  ist hingegen festzustellen, dass sich die Amplitude in Abhängigkeit von der Position des Messobjekts auf dem Encoder sehr stark ändert. Wird berücksichtigt, dass der ABS-Sensor auch eine Ausdehnung in diese Richtung hat, kann gefolgert werden, dass bereits eine leichte Änderung der Sensorposition in X-Richtung eine hohe Auswirkung auf das Sensorfeld hat. Dies bedeutet, dass das Modell weiter angepasst werden muss.

### 5.1.2 Kreisförmiges Encoderradmodell mit trapezartigen Magneten

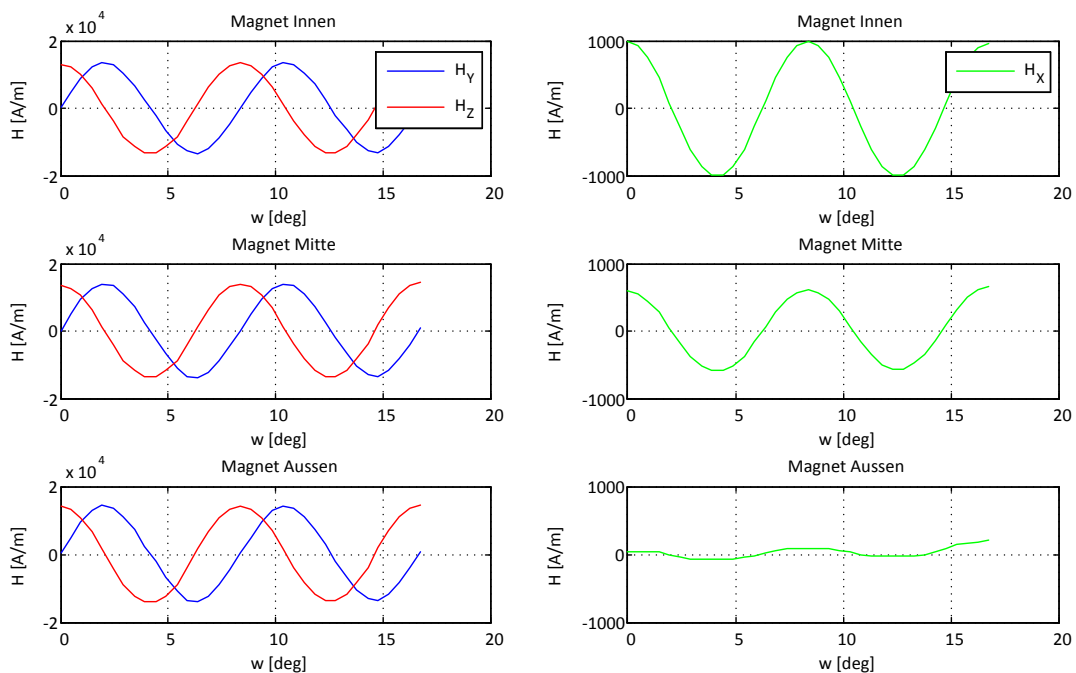
Da sich gezeigt hat, dass das abgerundete Modell hinsichtlich der Eigenschaften an den Rändern beziehungsweise an Stellen außerhalb der Encodermitte ebenfalls noch nicht für die Simulation mit dem Sensor geeignet ist, bedarf es einer darüber hinaus gehenden Änderung des Encoderrades. Eine weitere Änderung kann dahingehend durchgeführt werden, dass nicht mehr nur rechteckförmige Magnetteile, sondern trapezförmige erzeugt werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass der Abstand zwischen zwei Polen immer der gleiche ist. Zudem wird damit auch das Auftreten einer gleichmäßigeren Feldverteilung beabsichtigt. Um dies zu erreichen, wird das bereits

erwähnte Macro zur Erstellung eines Encoderrades abgewandelt, wodurch nun auch die genannten Magnetstrukturen erzeugt werden können. Bild 5.8 zeigt das verfeinerte Modell des aktiven Encoderrades.



5.8: Fertiges Modell des aktiven Encoderrades

Es wird deutlich, dass der Abstand zwischen den Magnetpolen nun überall gleich groß ist. Die drei blauen Streifen geben die Kurven an, auf denen die Simulationsergebnisse ausgewertet wurden. Auch hier wurde nicht entlang der Kurve, sondern mit Hilfe des Parameter Sweeps gerechnet. Die Feldstärke zeigt einen von innen nach außen an die Messung angelehnten Verlauf. Es ist nötig, mehrere Magneten nebeneinander zu simulieren, um Randeffekte wie zum Beispiel eine Amplitudenabschwächung zu den Enden hin klein zu halten. Das Simulationsergebnis ähnelt stark dem des kreisförmigen Rechteckmagneten (vgl. Bild 5.7) und wird in Bild 5.9 gezeigt.



5.9: Simulationsergebnisse kreisförmige Trapezmagneten

Erkennbar ist, dass die Änderung der geometrischen Eigenschaften des Magneten das gewünschte Ergebnis mit dem erwähnten Feldstärkeverlauf liefert. Da das Modell somit hinreichend genau die Messungen abbildet, kann dieses für eine Simulation des Gesamtsystems aus Sensor und Encoderrad verwendet werden.

Im nächsten Schritt wird die in Kapitel 4.3.2 gemessene Feldstärke eingestellt. Dazu wird das Nulllevel nicht in Höhe der Encoderoberfläche, sondern in einem Abstand von 0,5mm zu dieser festgelegt. Da die Encoderradmessung bei einem Abstand von 2mm erfolgte, wird die Feldstärke nun bei einer Entfernung von 2,5mm zur Encoderoberfläche eingestellt. Eine Überprüfung, ob die gemessene Feldstärke gut gewählt ist, kann erst dann erfolgen, wenn der Zusammenhang zwischen Simulation und Messung hergestellt worden ist. Sollte die gewählte Feldstärke nicht zu geeigneten Ergebnissen führen, müsste das Modell gegebenenfalls entsprechend angepasst werden.

### 5.1.3 Zusammenfassung

Das erstellte Modell (vgl. Bild 5.8) bildet das magnetische Verhalten des Golf 5 Encoders hinreichend gut nach. Außerdem konnte festgestellt werden, dass ein Abstand zu einem magnetischen Objekt den Feldverlauf glättet. Auf diese Weise ist es möglich, mit wenigen magnetischen Strukturen einen sinusförmigen Verlauf zu erhalten. Das Verständnis über das magnetische Verhalten des Encoders konnte erweitert werden. Unter Verwendung des erwähnten Macros können zudem weitere Encoderräder simuliert werden, wodurch beispielsweise eine Untersuchung des aktiven Referenzencoderrades der Firma NXP Semiconductors GmbH möglich wird, um dieses in Verbindung mit dem Sensor auf seine Systemeigenschaften hin zu untersuchen.

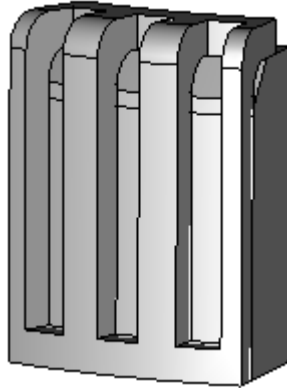
## 5.2 Modellierung der passiven Encoderräder

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel dargestellt, können geometrische Formen in CST nachgebildet werden. Dies Verfahren wurde insbesondere im Fall des Golf 4 Encoderrades angewandt, da hierfür im Gegensatz zum BMW 3er Encoderrad keine Abtastwerte vorhanden sind.

### Modell des Golf 4 Encoderrades

Bei der Modellierung des Golf 4 Encoderrades können die in Kapitel 4.2 gemessenen Werte zu Grunde gelegt werden. Die Konstruktion besteht aus Encoder und Metallwelle, wobei der Encoder ähnlich wie ein Kronkorken auf der Metallwelle fixiert wird. Bei dem realen Bauteil kann der Abstand zwischen dem Encoderteil und der Trägerwelle nicht bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass dieser Abstand nicht überall gleich groß ist und somit keine gute Aussage über die Güte der magnetischen Kopplung getroffen werden kann. Daher wird für den Abstand der idealisierte Wert

Null in CST eingegeben. Somit besteht das Encodermodell theoretisch aus einem Stück. Zur besseren Abbildung der Realität wurden dennoch zwei Teile erstellt. Das fertige Modell ist in Bild 5.10 dargestellt.

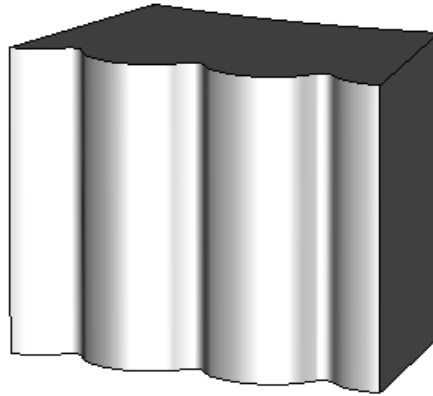


5.10: Modell des Golf 4 Encoderrades

Betrachtet man zum Vergleich Bild 4.5, in dem das reale Encoderrad abgebildet ist, so kann festgestellt werden, dass der obere Teil formgetreu nachgebildet wurde, wohingegen sich der untere Bereich vom Originalteil unterscheidet. Diese Vereinfachung wurde deshalb gewählt, da zum einen der Sensor nicht in diesen Bereich positioniert wird und so zum anderen durch die einfachere Struktur Rechenzeit eingespart werden kann.

#### Modell des BMW 3er Encoderrades

Als letztes Modell soll der BMW 3er Encoder erstellt werden. Hierfür kann der Datensatz aus der Vermessung genutzt werden, um daraus die 3D-Struktur zu erzeugen. Dazu werden die Daten in Matlab eingelesen und mit Hilfe eines Skriptes in eine neue Datei gespeichert, die das Drawing Interchange Format hat. Dieses Format ist kompatibel zu der vorliegenden CST Version und kann daher direkt importiert werden. Nach dem Import steht ein 2D-Modell zur Verfügung, das mittels einer so genannten Extrusion in ein 3D-Modell überführt werden kann. Als nächstes kann das Modell so ausgeschnitten werden, dass sich wieder die gleiche Zähnezahl wie bei dem Golf 4 Modell ergibt. Da die Daten direkt aus der Messung stammen, ist die Oberflächenstruktur noch rau. Dies hat zur Folge, dass das Mesh an diesen Stellen sehr hoch aufgelöst werden muss. Daher sollte die Oberfläche mittels einer Spline-Interpolation geglättet werden, wodurch auch hier wieder die Simulationszeit minimiert wird. Bild 5.11 zeigt das fertige Modell des BMW 3er Encoderrades.



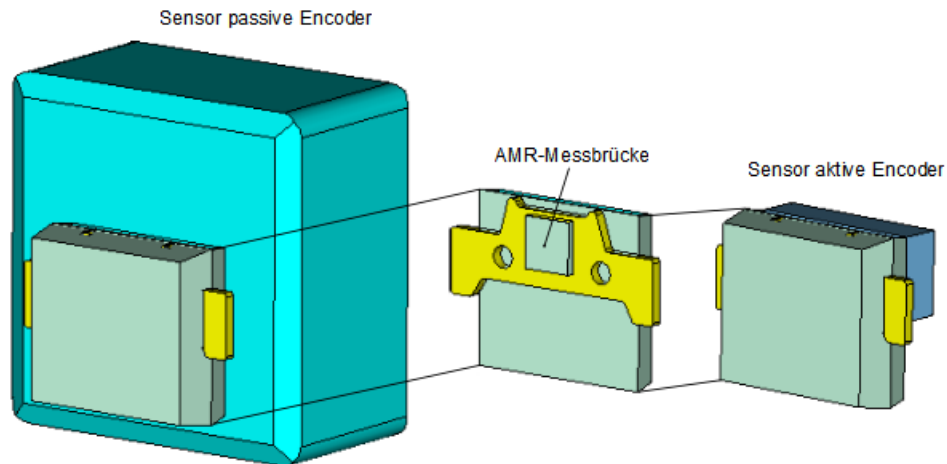
5.11: Modell des BMW 3er Encoderrades

Wie zuvor ist auch hier lediglich ein Ausschnitt erzeugt worden, um das Modell so klein wie möglich zu halten. Als Material dient für die beiden passiven Encoder ST37, da dieses ferromagnetisch ist und über die Beschaffenheit des tatsächlichen Werkstoffes wie erwähnt sonst keine weiteren Informationen vorhanden sind.

### 5.3 Modellierung des ABS Sensors

Auch für die Modellierung eines integrierten Bauelementes wie dem ABS-Sensor müssen Kenntnisse über die geometrische und Materialbeschaffenheit vorhanden sein. Um diesbezüglich Daten zu gewinnen, kann beispielsweise eine Schliifprobe erzeugt werden. Bei dieser wird der Kunststoff des Sensorgehäuses so lange abgeschliffen, bis die Struktur im Inneren sichtbar wird. Dieses Verfahren wurde in [13] bereits angewendet. Weiterhin finden auch Informationen aus den Datenblättern [7][8][15] Berücksichtigung.

Zunächst wird der Sensor so getreu wie möglich nachgebildet. Das betrifft sowohl die geometrischen als auch die Materialgegebenheiten. Nachdem dies geschehen ist, kann dann das Modell vereinfacht werden. Nicht magnetische Materialien müssen bei einer Berechnung nur dann berücksichtigt werden, wenn dadurch die Genauigkeit erhöht werden kann. Dies ist der Fall, wenn das Mesh in einem relevanten Bereich verfeinert wird. Andernfalls kann Rechenzeit eingespart werden. Aus diesem Grund wurde das Sensorgehäuse bei der Berechnung des Feldes ausgeblendet. Dies kann in den lokalen Mesh-Eigenschaften festgelegt werden. Bild 5.12 zeigt die beiden Modelle der ABS-Sensoren. Rechts ist der Sensor für passive Encoder, der einen großen Stützmagneten besitzt, dargestellt. Links ist das Modell des ABS-Sensors für aktive Encoder zu erkennen.

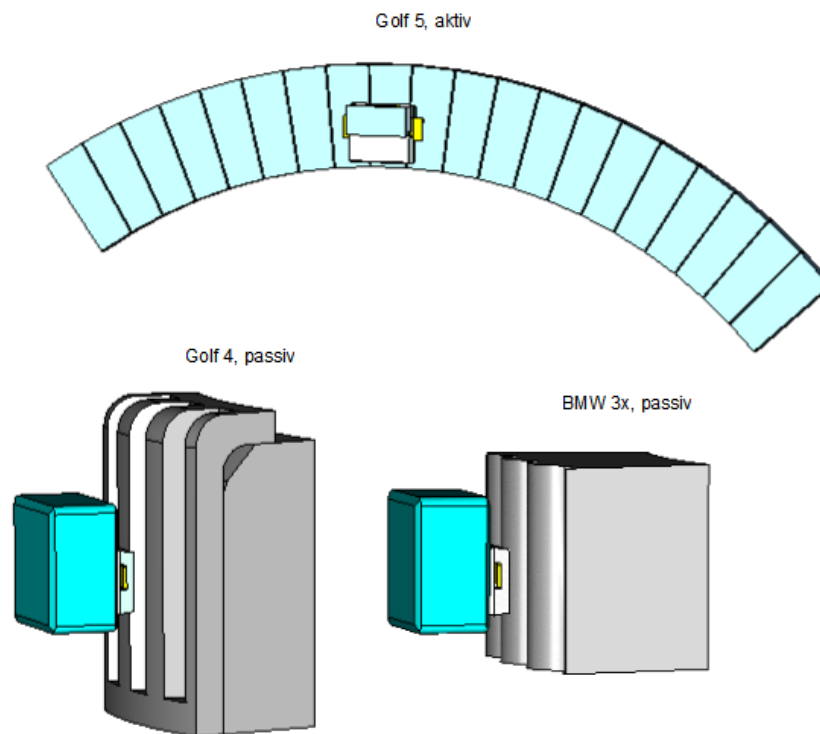


5.12: Modell des ABS-Sensors für passive und aktive Encoder

Die beiden Modelle sind bis auf den Stützmagneten gleich aufgebaut. In der Mitte ist der Innenaufbau des Modells zu sehen, welches sich aus dem Gehäuse (nicht magnetischer Kunststoff), dem Leadframe (nicht magnetisches Kupfer, hier gelb dargestellt) und der AMR-Messbrücke (Silizium) zusammensetzt. Weiterhin ist zu erkennen, dass nur der Sensorkopf mit der AMR-Messbrücke und nicht der Teil des Sensor-Bauelementes, in dem die ASICs eingebettet sind, nachgebildet wurde, da letzterer hier keinen Einfluss auf das Magnetfeld hat.

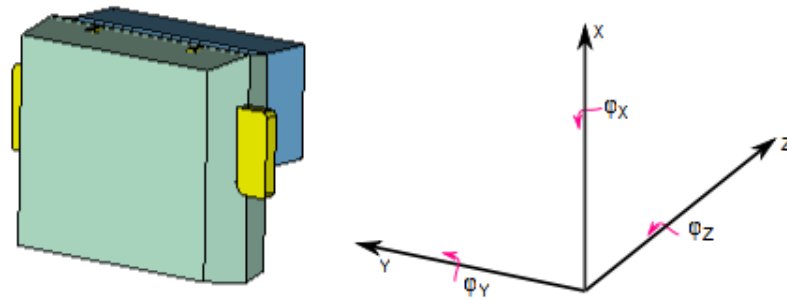
## 5.4 Modell des Gesamtsystems aus ABS-Sensor und Encoderrad

Zur Erstellung des Gesamtsystems sind nun alle nötigen Komponenten verfügbar. Da drei Encoder vorhanden sind, gibt es folglich auch drei Gesamtsysteme. Bild 5.13 zeigt die erstellten Modelle der Gesamtsysteme aus Sensor und Encoder.



5.13: Modelle der Gesamtsysteme aus Sensor und Encoder

Bei dem Golf 5 muss ein erweiterter Ausschnitt aus dem Encoderrad gewählt werden, um Randeffekte zu minimieren. Dadurch bleibt die Amplitude von Zahn zu Zahn gleich. Bei den passiven Encodern können die bereits gezeigten Modelle hingegen unverändert kombiniert werden. Die Modelle sind so parametrisiert, dass alle notwendigen Verkippungen und Verschiebungen eingestellt werden können. Damit ist es möglich, mit einem geringen Aufwand mehrere verschiedene Simulationen durchzuführen. Die Benennung der Achsen und Winkel ist durch [17] vorgegeben und wird in Bild 5.14 gezeigt.



5.14: Modellkoordinatensystem nach [17]

Da zwei Kategorien von Encodern, passiv und aktiv, vorhanden sind, müssen zwei unterschiedliche Einstellungen hinsichtlich der Simulationsumgebung vorgenommen werden. Um außerdem eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Simulationsergebnissen desselben Encoders zu schaffen, müssen auch hierfür die relevanten Simulationsparameter der Software festgelegt werden. Dazu wird untersucht, wie fein das Mesh zu wählen ist, damit sich das Simulationsergebnis kaum noch ändert. Hierzu kann das Mesh schrittweise verfeinert werden. Es stellt sich heraus, dass für die minimale Anzahl der Schritte eine Einstellung von 45 bei den beiden passiven Encodern und eine von 35 bei dem aktiven Encoder optimal ist. Der Unterschied resultiert hier vermutlich daraus, dass die geometrischen Formen bei dem aktiven Encoder größer sind als bei den passiven.

Weiterhin ist der Abstand zur Umgebung festzulegen, der hier, wie bereits erwähnt, 2cm zu allen Seiten beträgt. Als Begrenzung wird „normal“ eingestellt. Zudem muss die Genauigkeit der Simulation gewählt werden, die hier  $10^{-6}$  ist. Um die Ergebnisse zu verbessern, kann ein adaptives Meshing durchgeführt werden. Dabei wird die Simulation mehrere Male nacheinander durchgeführt. Bei jedem neuen Durchgang wird das Mesh an den für die Berechnung relevanten Stellen verfeinert. Mit zunehmender Feinheit erhöht sich dabei die Simulationsdauer ständig. Als Grenze für diese Art der Berechnung wird eingestellt, dass mindestens zwei und höchstens sechs Durchläufe je Simulationsschritt durchgeführt werden sollen. Damit sind alle nötigen Umgebungsparameter festgelegt und eine Simulation des Encoder-Sensor-Systems kann gestartet werden.

Als letztes muss der Winkel, um den sich das jeweilige Encoderrad je Simulationsschritt dreht, festgelegt werden. Dafür wird auf Erkenntnisse aus [18] zurückgegriffen. Hier werden 64 Abtastwerte je Periode aufgezeichnet und später ausgewertet. Um eine spätere Vergleichbarkeit zu schaffen, wird auch für die Simulation eine „Abtastung“ des Feldverlaufes von 64 Punkten gewählt. Dies hat außerdem den Vorteil, dass eine ebenso lange FFT durchgeführt werden kann, um die Frequenzanteile zu bewerten. Dabei ist darauf zu achten, dass bei einer Berechnung der FFT ein periodisches Signal angenommen wird. Wird von einem sinusförmigen Verlauf der Magnetfeldänderung



ausgegangen, so ist darauf zu achten, dass  $\sin(0) = \sin(2\pi)$  gilt. Damit ergibt sich für die Wahl der Sweep-Parameter der

$$Endwinkel = \frac{Winkel_{max} - Startwinkel}{Schrittzahl} \cdot (Schrittzahl - 1) \quad (5.2)$$

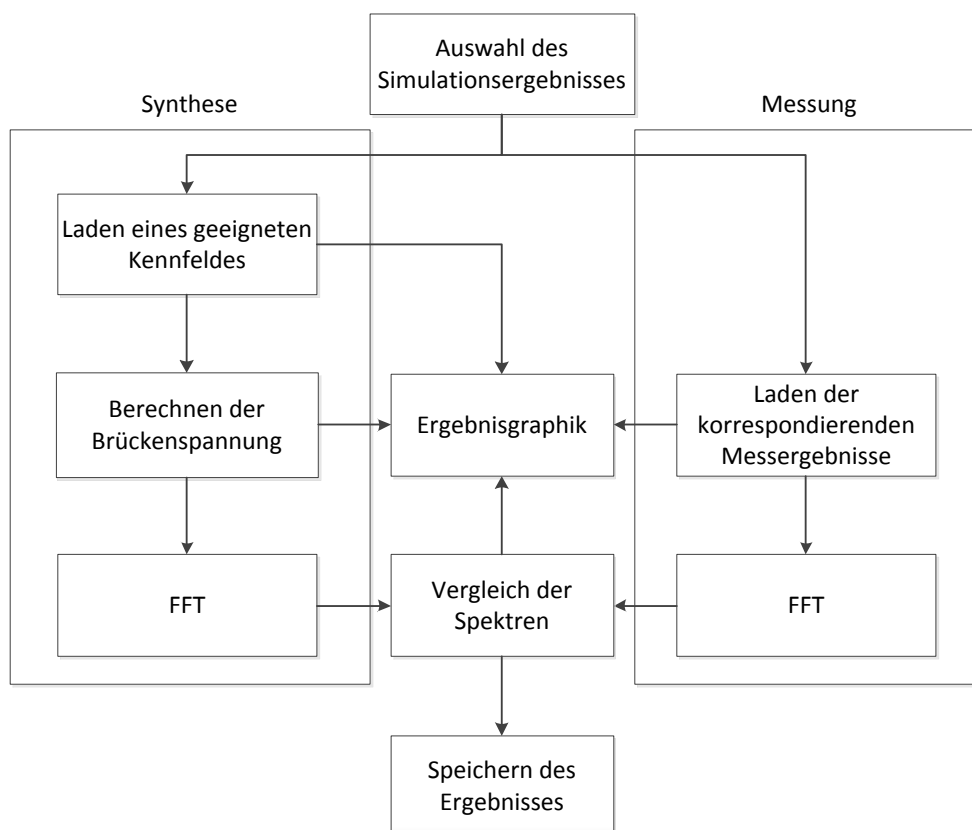
mit dem  $Winkel_{max} = 360^\circ / Zähnezahl_{Encoder}$ , der  $Schrittzahl = 64$  und es gilt  $Startwinkel < Winkel_{max}$ . Der Startwinkel ist in den Simulationen ohne Einschränkung der Allgemeinheit zu Null gesetzt. Auf diese Weise wird eine doppelte Nullstelle verhindert und die Periode wird äquidistant mit der gewünschten Anzahl der Stützstellen abgetastet. Bei jedem der Simulationsschritte wird das Magnetfeld des Systems berechnet und mit diesem die Magnetfeldstärke bestimmt, die auf jeden der vier Widerstände im Sensor auftritt. Dazu wird der Mittelwert der Magnetfeldstärke für alle Feldkomponenten auf diesen Flächen berechnet.

## 6 Synthese der Brückenspannung aus Simulationsergebnissen

In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur Auswertung der Simulationsergebnisse vorgestellt. Hierzu werden die gewonnenen Feldstärkedaten der Simulationen mit Hilfe der in Kapitel 3.4 gewonnenen Kennfelder zu der Brückenspannung synthetisiert. Außerdem wird eine graphische Benutzeroberfläche eingeführt, mit der auf einfache Weise Auswertungen durchgeführt werden können. Darauf folgt die Darstellung des Anzeigekonzeptes, anhand dessen eine Bewertung der Ergebnisse vorgenommen werden kann, indem die Synthese- mit den aus [16] entnommenen Messergebnissen verglichen werden.

### 6.1 Auswertung der simulierten Feldstärken

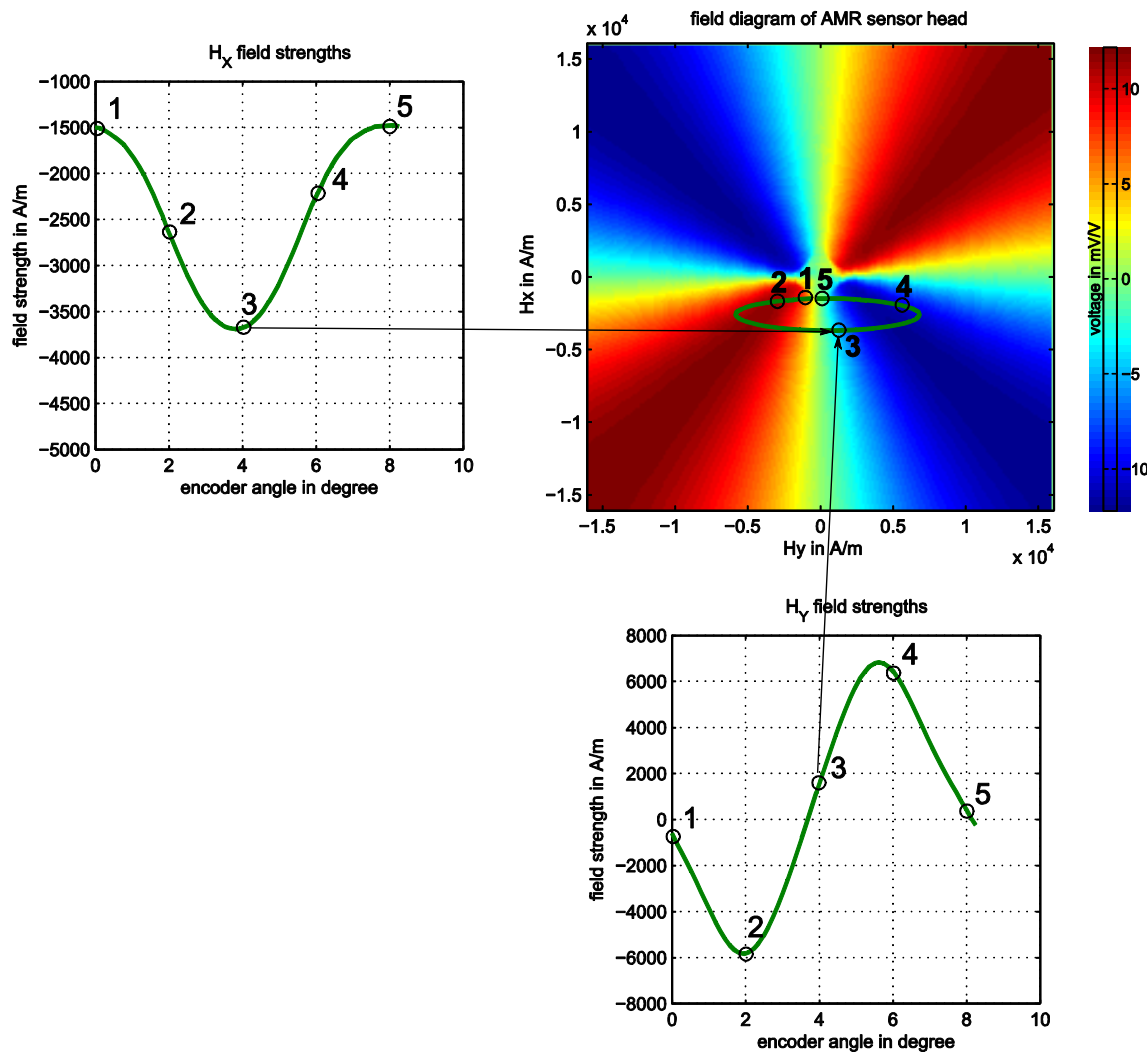
Der Ablauf der Auswertung eines Simulationsergebnisses ist schematisch in Bild 6.1 dargestellt.



6.1: Schematischer Ablauf der Auswertung eines Simulationsergebnisses

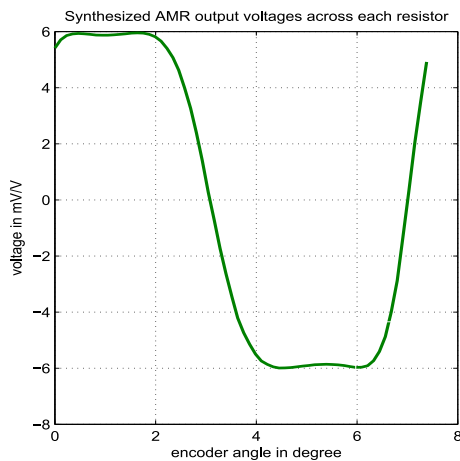
Als erstes werden die Messdaten des Radmessplatzes aus dem in der graphischen Benutzeroberfläche (GUI) angegebenen Ordner geladen. Die GUI wird im Anschluss an die Synthese kurz vorgestellt. Der Ordner wird mittels einer Funktion nach den passenden Daten durchsucht. Ist eine entsprechende Messung vorhanden, werden diese Daten geladen. Dies beinhaltet hauptsächlich die vom Oszilloskop während der Messung aufgezeichneten Brückenspannungswerte. Dann werden diese Daten normiert, das heißt eine eventuell vorhandene Verstärkung sowie die Versorgungsspannung der Messbrücke werden rechnerisch entfernt. Somit erhält man einen Signalverlauf mit der Einheit  $mV/V$ . Außerdem werden die Nullstellen der Oszilloskopdaten gesucht und gespeichert. Da je Simulation lediglich eine Periode, das heißt von einem Zahn zum nächsten simuliert wird, kann diese folglich nur mit einer einzigen vom Oszilloskop gemessenen Periode gegenübergestellt werden. Als nächstes wird das Sensorkennfeld geladen. Wurde vom Benutzer ein Kennfeld vorgegeben, wird dieses geladen. Andernfalls werden die Simulationsdaten nach den maximalen auftretenden Feldstärken durchsucht und daraufhin das Kennfeld ausgewählt, welches möglichst bis zum Rand ausgenutzt wird.

Anhand der geladenen Simulationsdaten kann nun die Brückenspannung berechnet werden. Die Feldstärkepaare aus  $H_X$  und  $H_Y$  können dazu genutzt werden, die jeweilige Sensorspannung dieser aus dem Kennfeld auszulesen. Bild 6.2 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise bei der Synthese der Spannung einer der Brückenwiderstände. Auf der linken Seite wird der simulierte Feldverlauf des Magnetfeldes  $H_X$  und im unteren Bereich der des Magnetfeldes  $H_Y$  gezeigt. Rechts oben ist das Sensorkennfeld mit einer Ellipse zu erkennen. Diese Ellipse ergibt sich, wenn die Feldstärkepaare Schritt für Schritt an das Kennfeld angelegt werden. Dies ist mit Hilfe der Ziffern 1 bis 5 schematisch dargestellt.



6.2: Vorgehensweise bei Synthese der Spannung eines Brückenspannungswiderstandes

Wird der Spannungsverlauf entlang dieser Ellipse aufgezeichnet, ergibt sich der in Bild 6.3 zu erkennende Verlauf.



6.3: Spannungsverlauf entlang einer Ellipse im Sensorkennfeld

Ein solcher Spannungsverlauf ergibt sich für jeden der vier Widerstände. Die Einheit des gezeigten Verlaufs ist eine normierte Spannung, die dem des Sensorkennfeldes entspricht. Aus den vier Widerstandsspannungen soll nun die Brückenspannung errechnet werden. Dies kann auf Grund der Normierung des Kennfeldes auf einfache Weise geschehen. Dazu werden die normierten Halbbrückenspannungen

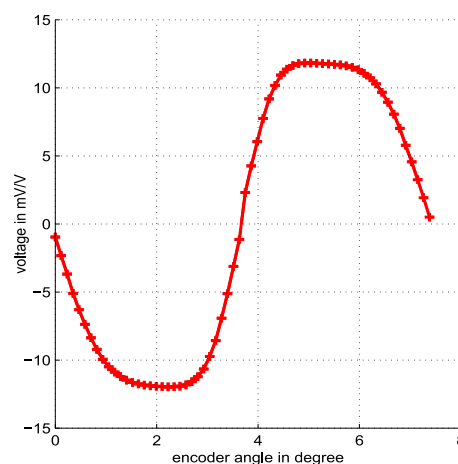
$$\frac{U_{b1}}{U_0} = \frac{1}{\frac{0,5 \cdot U_0 + U_{R1} \cdot U_0}{0,5 \cdot U_0 - U_{R3} \cdot U_0}} \quad (6.1)$$

$$\frac{U_{b1}}{U_0} = \frac{1}{\frac{0,5 + U_{R1}}{0,5 - U_{R3}}}$$

und

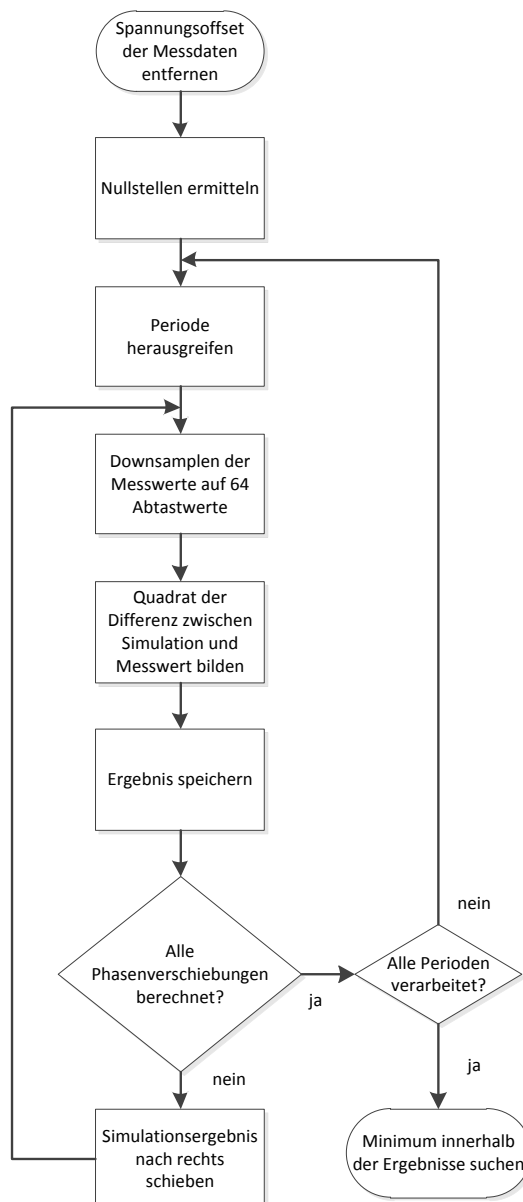
$$\frac{U_{b2}}{U_0} = \frac{1}{\frac{0,5 - U_{R2}}{0,5 + U_{R4}}} \quad (6.2)$$

berechnet. Mit diesen Spannungen kann durch Bilden der Differenz  $U_{synth} = U_{b1} - U_{b2}$  die normierte Brückenspannung berechnet werden. Die gesamte Rechnung kann deshalb durchgeführt werden, da bekannt ist, dass die beiden Halbbrückenwiderstände entgegengesetzt auf eine Magnetfeldänderung mit einer Widerstandsänderung reagieren (vgl. Bild 2.14) und bei der Messung ein homogenes Feld im KSpK vorhanden ist. Somit kann die Brückenspannung für jeden Simulationsschritt bestimmt werden. Auf diese Weise wird der Spannungsverlauf des Sensors erzeugt. In Bild 6.4 wird ein berechneter Brückenspannungsverlauf exemplarisch dargestellt.



6.4: Exemplarischer synthetisierter Brückenspannungsverlauf

Zu erkennen ist ein annähernd sinusförmiger Signalverlauf. Die synthetisierte Ausgangsspannung der Brücke kann nun mit einem am Radmessplatz gemessenen Signal verglichen werden. Wie bereits erwähnt, werden je Messung am Radmessplatz mehrere Perioden der Brückenspannung aufgezeichnet. Bei einem idealen System kann eine beliebige Periode aus den Aufzeichnungen gewählt werden. Da das System jedoch Schwankungen und Toleranzen unterliegt, sind die Perioden nicht gleich. Aus diesem Grund wird zum Vergleich die Periode ausgewählt, welche der simulierten am ähnlichsten ist. Bild 6.5 dient dazu, den Ablauf der Suche nach der Periode, die die beste Übereinstimmung hat, zu verdeutlichen.



6.5: Ablauf der Suche nach der besten Periode

Zu Beginn der Suche werden die Messwerte offsetfrei gemacht, da auch das synthetisierte Signal stets frei von einem Offset ist. Danach werden die Nullstellen der

Messwerte gesucht, damit das Signal in einzelne Perioden aufgeteilt werden kann. Nun wird die erste Periode herausgegriffen und so heruntergesampled, dass die Anzahl der Abtastwerte von Messwert und synthetisierter Brückenspannung gleich ist. Daraufhin wird die Differenz eines jeden Abtastwertes gebildet und diese quadriert. Danach wird die Summe aller Differenzenquadrate gebildet und gespeichert. Nun wird die Messwertperiode um einen Abtastwert nach rechts verschoben, was einer Phasenverschiebung entspricht. Als nächstes werden wieder solange die Summen der Differenzenquadrate gebildet, bis alle möglichen Verschiebungen abgearbeitet sind. Diese Vorgehensweise wird für alle Perioden des gemessenen Signals wiederholt. Am Ende wird der kleinste von den gespeicherten Werten gesucht. Dieser gibt an, welche Periode mit welcher Phasenschiebung die kleinste Abweichung zu dem synthetisierten Signal aufweist. Diese Periode wird für die weitere Verarbeitung verwendet.

Wie bereits erwähnt, kann eine Harmonischen-Analyse nach [18] dazu verwendet werden, die Güte des Sensorsignals zu bewerten, um auf eine mögliche Fehleinbaulage zurückzuschließen. Dazu kommen zwei mögliche Faktoren zur Anwendung, zum einen der so genannte HDI, der nach [19] mit

$$k_{HDI,\%} = 100\% \cdot \sqrt{\frac{P_{ges} - P_1}{P_{ges}}} \quad (6.3)$$

berechnet wird. Da die Leistung des simulierten Signals nicht bekannt ist, muss der HDI leicht abgewandelt werden. Damit dieser von dem ursprünglichen HDI unterscheidbar ist, wird dieser im Folgenden mit HDIs bezeichnet.

$$k_{HDIs,\%} = 100\% \cdot \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} |U_h^2|}{\sum_{h=1}^{\infty} |U_h^2|}} \quad (6.4)$$

Dabei ist im Falle der Frequenzverdopplung darauf zu achten, die zweite Harmonische als erste zu betrachten. Der HDIs gibt somit den Verzerrungsgrad eines Signals an, indem die Leistung der harmonischen Schwingungen auf die Gesamtleistung der Harmonischen bezogen wird.

Zum anderen kommt der HD5, der dem HDIs stark ähnelt, als ein weiterer Faktor zur Anwendung. Allerdings zieht dieser nur die ersten fünf Harmonischen in die Berechnung mit ein. Dieses Verfahren wurde entwickelt, um Rechenleistung zu sparen. Damit ergibt sich für die Berechnung des HD5 nach [20]

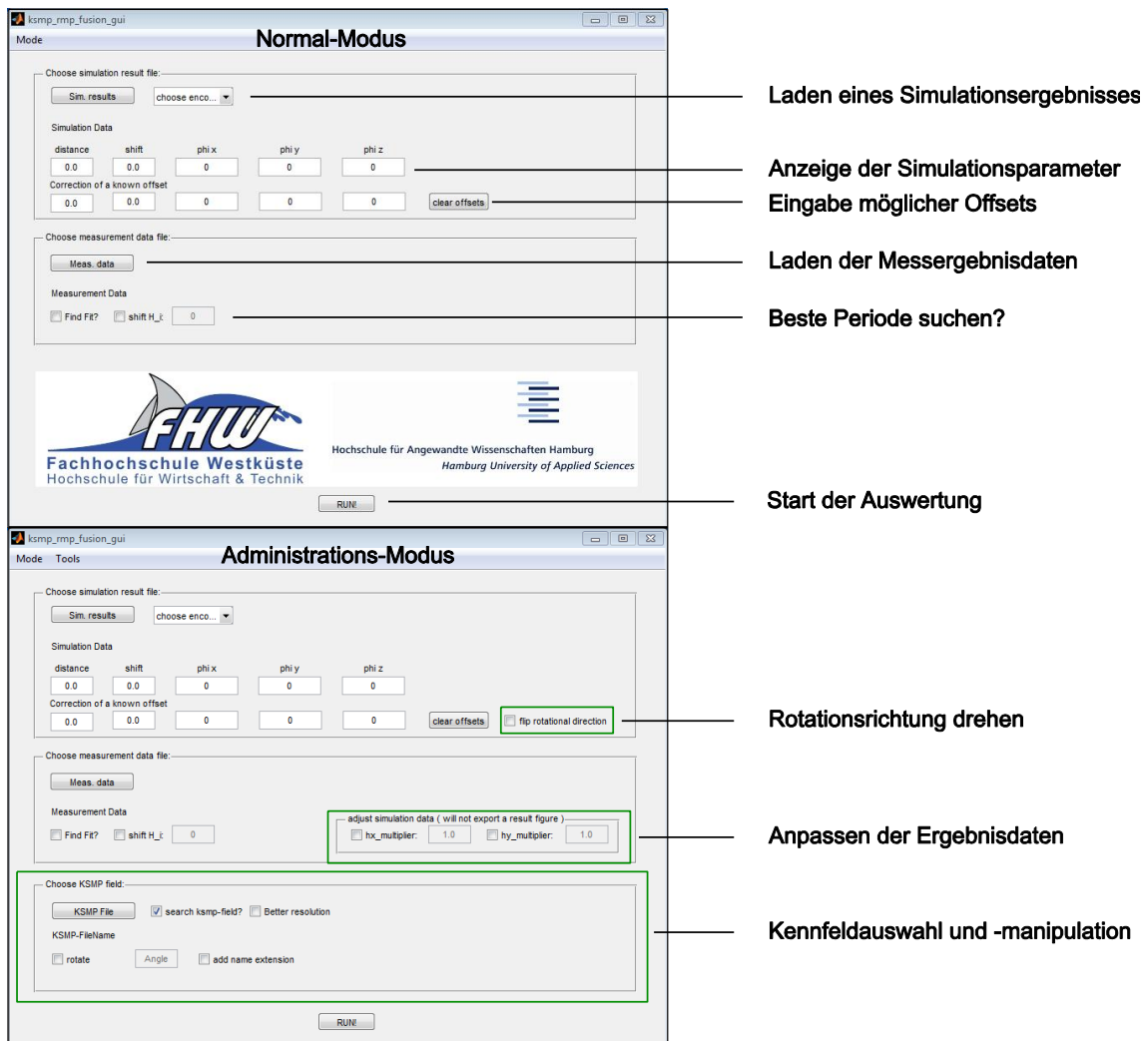
$$k_{HD5,\%} = 100\% \cdot \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^5 |U_h^2|}{\sum_{h=1}^5 |U_h^2|}}. \quad (6.5)$$

Wird eine FFT durchgeführt und das Betragsspektrum gebildet, können diese Faktoren ohne weiteren Aufwand berechnet werden. Da je Periode 64 Abtastwerte simuliert wurden, kann eine 64 Punkte FFT durchgeführt werden. Im Ergebnis erhält man somit direkt die Harmonischen als Werte der FFT. Dies gilt solange die höchste Amplitude der erste bin ist und folglich bin 2,3,4 und so weiter die nächsten Harmonischen sind. Andernfalls ist in diesem System der zweite bin der höchste, was eine Frequenzverdopplung bedeutet. Dadurch stellt der zweite bin die erste Harmonische dar und die bins 4, 6, 8 und so weiter die nächsten. Ähneln sich die HD-Faktoren des gemessenen und des synthetisierten Signals, gibt dies einen ersten Aufschluss darüber, ob sich die Signale ähneln. Um eine Aussage über die Ähnlichkeit der Signale treffen zu können, werden im Rahmen einer zweiten Methode die berechneten FFT-Ergebnisse tabellarisch miteinander verglichen. Die Harmonischen werden zum einen ihre Amplitude und zum anderen ihre Phase betreffend gegenübergestellt sowie deren Abweichung berechnet. Ergeben sich nur kleine Abweichungen, ist folglich die Ähnlichkeit groß.



## Graphische Benutzeroberfläche zur erleichterten Auswertung

Für die benutzerfreundliche Durchführung einer Auswertung kann die in Matlab erstellte GUI, die in zwei Modi ausgeführt werden kann, verwendet werden. Bild 6.6 zeigt diese GUI in den beiden Modi.



6.6: Graphische Benutzeroberfläche für die Auswertung von Simulationsdaten

Nach dem Start wird die GUI im normalen Nutzermodus ausgeführt. Um eine Auswertung vorzunehmen, stehen hier nur die wichtigsten Einstellungen zur Verfügung. Im Administrationsmodus können hingegen erweiterte Einstellungen vorgenommen werden. So können zum Beispiel Offsets und Multiplikatoren für die Feldstärken eingegeben werden. Ein Speichern von Syntheseergebnissen ist nur dann möglich, wenn keine Simulations- oder Messdaten manipuliert werden. Eine Manipulation ist dann nützlich, wenn ein neues Encodermodell erstellt beziehungsweise getestet werden soll.

Die GUI ist so gestaltet, dass diese von oben nach unten abgearbeitet wird. Der Nutzer wählt zuerst eine Simulationsergebnisdatei, welche unmittelbar geladen wird und aus welcher die Simulationsparameter ausgelesen und zur Kontrolle in der GUI angezeigt werden. Nun hat der Benutzer die Möglichkeit jeden Parameter mit einem Offset zu belegen beziehungsweise zu korrigieren. Dies beeinflusst die Simulationsergebnisse nicht, führt aber dazu, dass Messergebnisse geladen werden, die mit diesen Werten übereinstimmen. Auf diese Weise können Ungenauigkeiten im Modell wie zum Beispiel ein konstantes Offset ausgeglichen werden. Der Pfad, in dem die Messergebnisse abgelegt sind, wird automatisch anhand der gewählten Simulationsergebnisdatei vorausgewählt. Dieser kann von dem Benutzer durch Betätigen des Button „Meas. data“ manuell geändert werden. Auf diese Weise ist es ohne Weiteres möglich, neu erzeugte Messergebnisse zu nutzen.

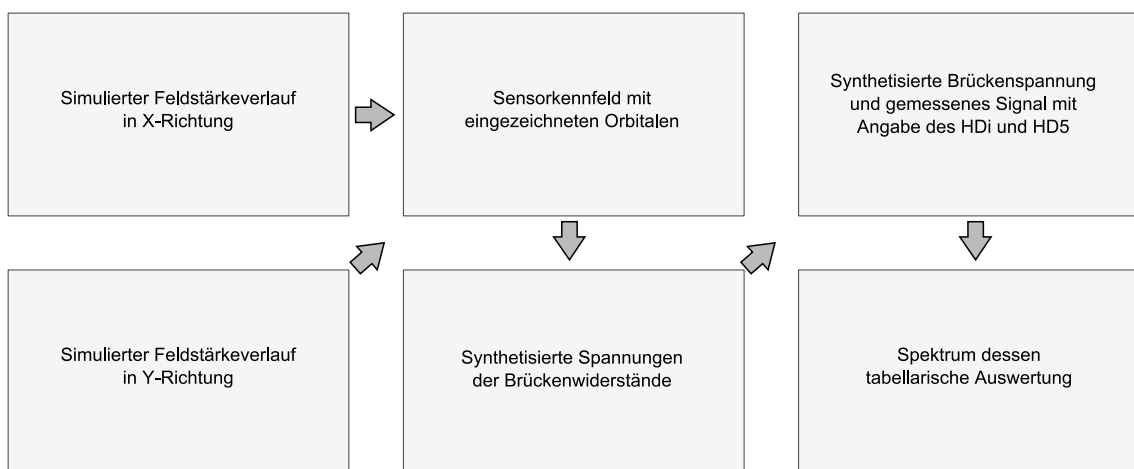
Da, wie bereits erwähnt, für jede Messung mehrere Signalperioden vorhanden sind, ist es möglich, die Periode suchen zu lassen, die der simulierten am ähnlichsten ist. Dies kann mit dem Haken „Find Fit?“ ausgewählt werden. Sollte eine Phasenverschiebung bekannt sein, kann diese bei Auswahl des Hakens „shift H<sub>i</sub>“ in dem nebenstehenden Eingabefeld eingegeben werden. Hierbei wird die Anzahl der Abtastungen angegeben, um die während der Auswertung das Signal verschoben wird. Im Modus „Normal“ sind an diesem Punkt alle nötigen Eingaben vorhanden und die Auswertung kann mit dem Button „Run!“ gestartet werden.

Wurde hingegen der Administrationsmodus gewählt, stehen erweiterte Eingabeoptionen zur Verfügung (vgl. Bild 6.6 unten). Hier kann zusätzlich die Rotationsrichtung der Simulation umgedreht werden. Dies ist dann notwendig, wenn Messung und Simulation eine unterschiedliche Rotationsrichtung aufweisen. Weiterhin ist es möglich, die Simulationsergebnisse zu beeinflussen. Dabei können die Feldstärken  $H_X$  und  $H_Y$  mit Faktoren multipliziert werden, die in den jeweiligen Eingabefeldern vorgegeben werden. Eine solche Manipulation deaktiviert die Möglichkeit der Speicherung des Ergebnisses. In der Grundeinstellung wird das geeignetste Sensorkennfeld nach Auswertung der maximalen auftretenden Feldstärken automatisch gewählt. Im Administrationsmodus kann vom Benutzer ein bei der Auswertung zu nutzendes Kennfeld ausgewählt werden. Zudem besteht die Option, das Kennfeld zu rotieren. Dies ist dann notwendig, wenn bei der Vermessung im KSMP eine Verdrehung des KSpK vorgelegen hat. Der entsprechende Winkel kann ebenfalls im Eingabefeld eingegeben werden.

Wird die Ausführung mit dem Button „Run!“ gestartet, werden alle Parameter an eine Matlabfunktion übergeben, in der die Auswertung durchgeführt wird. Der Matlabcode der Auswertefunktion kann in Anhang C gefunden werden.

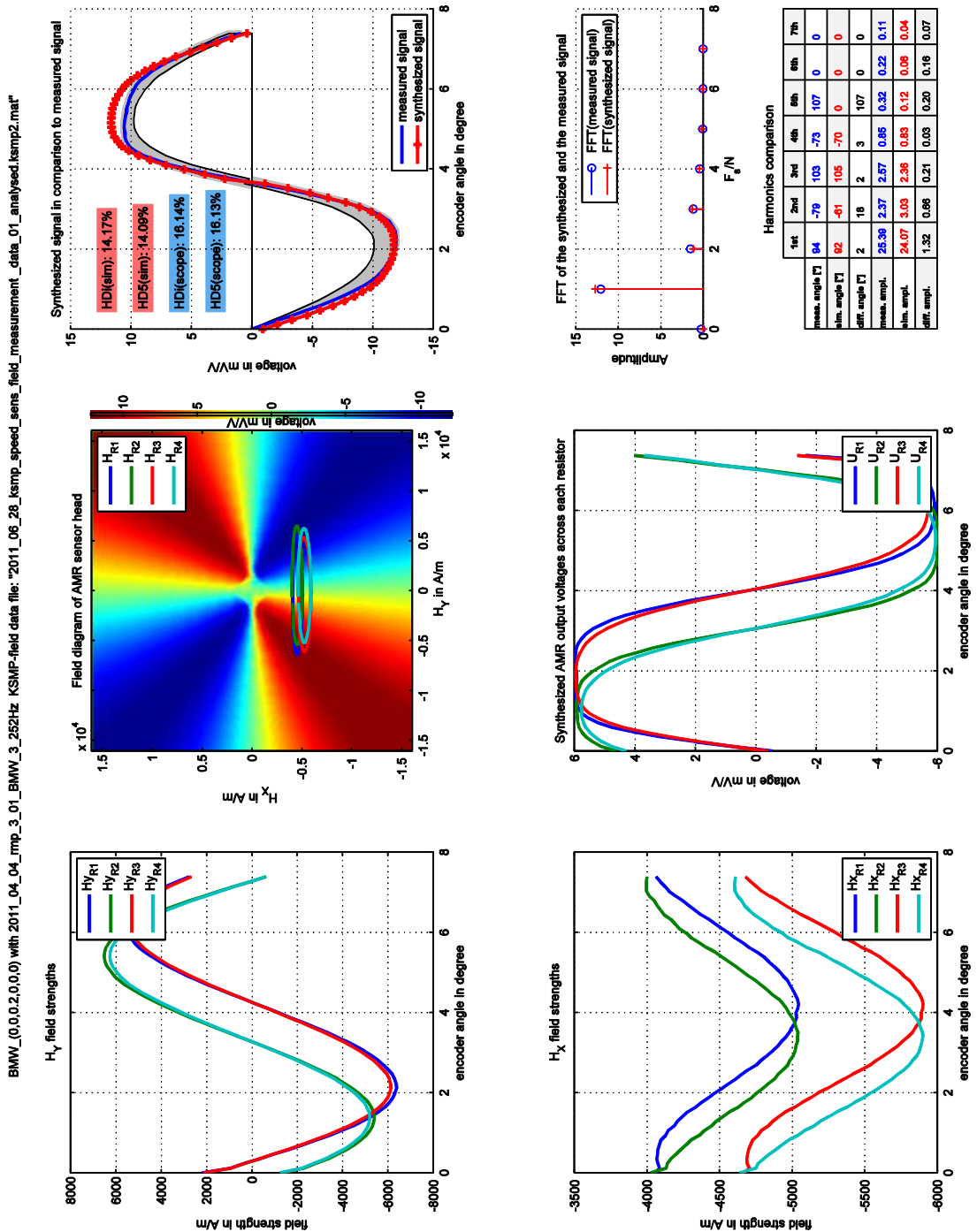
## 6.2 Darstellung der Syntheseergebnisse

Damit die Simulationsdaten des Simulationsplans ausgewertet und miteinander verglichen werden können, wird eine einheitliche graphische Ausgabe benötigt. Hier werden alle wichtigen Informationen übersichtlich dargestellt. Dazu gehören sowohl das synthetisierte als auch das gemessene Signal. Auch der eigentliche Schritt der Synthese, das Entnehmen der Spannungswerte der Einzelwiderstände der Brücke, wird dargestellt, um Unterschiede im Verhalten des Sensorsignals bei verschiedenen Verkipfungsszenarien erkennen zu können. Bild 6.7 gibt Aufschluss über den Aufbau der Ergebnisgraphik.



6.7: Aufbau der Ergebnisgraphik

Auf der linken Seite der Abbildung sind die Eingangsgrößen, das heißt die simulierten Magnetfeldstärkeverläufe abgebildet. Diese werden mit Hilfe des Sensorkennfeldes, in der Mitte oben zu erkennen, zu den Spannungen der Brückenwiderstände synthetisiert (vgl. Bild 6.2). Der Brückenspannungsverlauf, der nach Gl. (6.1) und (6.2) berechnet wird, ist rechts neben dem Kennfeld angeordnet. Außerdem wird hier die gemessene Periode, die diesem gegenübergestellt ist, dargestellt. In den Fällen, in denen es sinnvoll ist, wird hierbei zusätzlich der Bereich angezeigt, in dem sich die gemessenen Signale bewegen. Weiterhin wird auch der HDIs und der HD5 für beide Signale ausgegeben. Der letzte Teil der Ergebnisgraphik im rechten unteren Bereich wird dazu verwendet, die jeweilige FFT der beiden Signale zu zeigen. Das Spektrum für die ersten acht harmonischen Schwingungen wird hier zum einen gezeigt und zum anderen tabellarisch ausgewertet. Die Tabelle enthält die Abweichungen zwischen den Amplituden und den Winkeln der verglichenen Signale. Bild 6.8 zeigt eine Ergebnisgraphik, die nach dem eben erläuterten Schema aufgebaut ist.



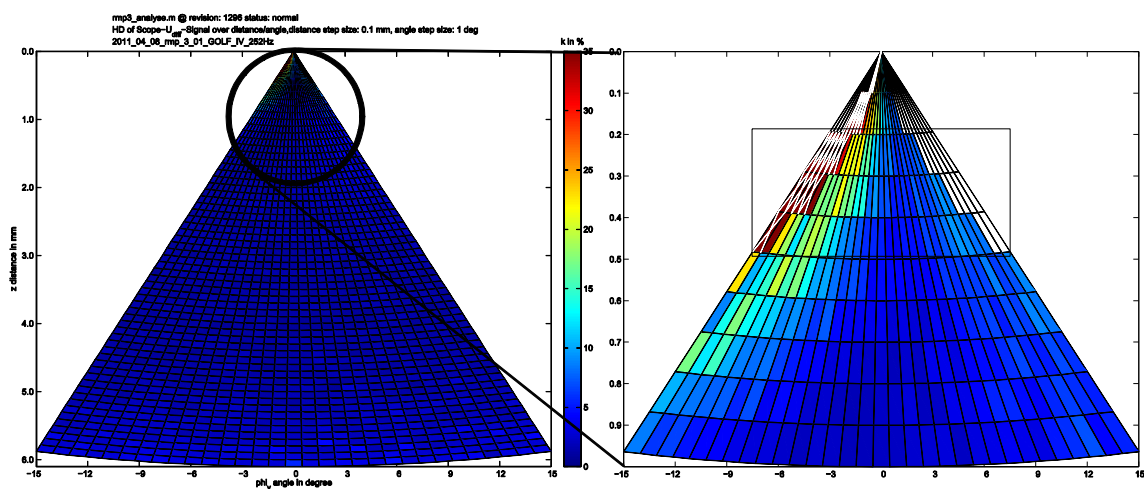
6.8: Beispiel einer Ergebnisgraphik nach vorgestelltem Schema

Um eine bessere Lesbarkeit zu gewährleisten, werden die Ergebnisgraphiken der Auswertung stets im Querformat dargestellt. Über den bereits beschriebenen Feldern ist eine Textzeile zu erkennen. Diese gibt Aufschluss über den simulierten Encodertyp und die Entfernungen zwischen Encoder und Sensor. Das verwendete Format ist nach dem Schema (X-Abstand, Y-Abstand, Z-Abstand,  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$ ,  $\varphi_Z$ ) aufgebaut. Hierbei sind die Abstände in X- und Y- Richtung von dem Idealpunkt Mitte-Mitte über dem Encoder angegeben. Für eine bessere Lesbarkeit wird der Abstand in Z-Richtung negativ angegeben. Somit ergeben sich für Abstände größer als Null positive Zahlen, was nach

dem von [17] vorgestellten Koordinatensystem jedoch nicht der Fall ist (vgl. Bild 5.14). Alle Abstände werden in mm angegeben. Die Winkel  $\varphi_i$  sind die Verkippungen um die jeweilige Achse  $i = \{X, Y, Z\}$ . Für das gezeigte Beispiel in Bild 6.8 bedeutet dies, dass hier die Ergebnisgraphik des BMW 3er Encoderrades mit einem Abstand von 0,2mm zwischen Sensor und Encoder und ohne Verkippungen dargestellt ist. Danach wird der Name des Ordners angegeben, in dem nach den Messergebnissen gesucht wird. Dieser ergibt sich nach dem von [16] verwendeten Messplan. Zusätzlich wird der Name des verwendeten Sensorkennfeldes ausgegeben. Die zwei letzteren Ausgaben dienen der Möglichkeit, neue Messwerte und Kennfelder einzubinden und dennoch die Ergebnisse unterscheiden zu können. Neben der Synthese wurde eine Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Prüfung befinden sich in Anhang A Bild A 42.

### 6.3 Auswahl der Simulationssetups

Mittels der Simulation kann gleichzeitig um alle drei Achsen verkippt werden. Dies findet hier keine Anwendung, da auf dem Randmessplatz nur Messungen mit je einer Verkippung zu einer Zeit durchgeführt wurden [16]. Für eine Auswahl von interessanten Simulationssetups werden genau diese Messwerte zu Grunde gelegt, da je durchzuführender Simulation eine Simulationszeit von circa 35 Stunden angenommen werden muss, sofern nur ein Lösungsmodul der Software zur Verfügung steht. Trotzdem gilt, dass jede Simulation an einer beliebigen Stelle in einer der Ergebnispyramiden ein Ergebnis liefern muss, welches mit einer durchgeführten Messung übereinstimmt. Bild 6.9 zeigt beispielhaft ein Ergebnis einer solchen Messung aus [16].



6.9: Exemplarisches Ergebnis einer Messung am Radmessplatz bei einer Verkippung um die Y-Achse des Golf 4 Encoderrades nach [16]

Die zu erkennenden Pyramiden repräsentieren die am Radmessplatz gewonnenen Messergebnisse bei der Vermessung des Golf 4 Encoderrades mit einer Verkippung um die Y-Achse. Auf der Y-Achse der Pyramiden ist die Entfernung zum Encoderrad aufgetragen, auf der X-Achse der Verkippungswinkel. Die Spitze stellt die Entfernung 0mm zum Encoderrad dar. Je weiter man zu der Basis gelangt, umso mehr erhöht sich dementsprechend die Entfernung. Auf der rechten Seite ist zusätzlich die Spitze der Pyramide vergrößert dargestellt. Hier wurde nicht die Ausgangsspannung der Brücke aufgetragen, sondern das Ergebnis der Harmonischen-Analyse (vgl. Gl. (6.4) und (6.5)) der Brückenspannung, da hierdurch eine bessere Aussage über die Güte des Signals getroffen werden kann [18]. Eine blaue Färbung bedeutet einen niedrigen Faktor, das heißt wenig Oberwellen und dementsprechend ein Signal mit einer hohen Güte. Eine rote Färbung bedeutet, dass starke Oberwellen vorhanden sind. Ein zusätzliches Kreuz in einem Feld zeigt an, dass hier eine Frequenzverdopplung aufgetreten ist.

Damit nicht nur Signale mit hoher Güte miteinander verglichen werden, werden einige Abstand-Verkippungs-Paare ausgewählt, die als repräsentativ gelten. In Anhang A können sämtliche relevanten Messergebnis-Pyramiden aus [16] und die Simulationspläne gefunden werden. Da für jede Simulation mit den vorgestellten Parametern, wie bereits erwähnt, 35 Stunden benötigt werden, ergibt sich für die passiven Encoder insgesamt eine Rechenzeit von circa 44 Tagen. Für den Golf 5 sieht der Simulationsplan 22 Simulationen vor. Da in diesem Modell kein ferromagnetisches Material vorhanden ist, reduziert sich die Rechenzeit hier auf circa 16 Stunden je Simulation. Dies erhöht die Gesamtsimulationsdauer auf circa 59 Tage.

## 6.4 Fehlerquellen und Toleranzen des Messsystems

Für eine spätere Bewertung der Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Messergebnissen muss das Gesamtsystem hinsichtlich seiner Toleranzen und Fehlerquellen betrachtet werden. Fehler können sowohl bei der Messung am Radmessplatz als auch bei der Messung im KSMP auftreten. Hinzu kommen die Toleranzen der mechanischen Teile. Die Betrachtung dieser Abweichungen ist wichtig, da ein Modell in einer Simulationsumgebung lediglich ein idealisiertes Abbild der Realität darstellt und somit in der Simulation beispielsweise genau der Abstand berechnet wird, der im Modell eingegeben wird.

Im Folgenden werden die wichtigsten Einflüsse und Toleranzen in der Reihenfolge ihrer Einflussstärke aufgelistet.

### 1. Radmessplatz

- Der Abstand zwischen Encoderrad und Sensor hat ein variables Offset zwischen 0,1mm und circa 0,5mm, das heißt die Nullposition hat hier einen systematischen Ausgangsfehler, der in allen Messungen erhalten bleibt.

- Die passiven Encoderräder weisen einen Radunrundlauf auf, der im Bereich von einigen 1/10mm liegt. Dabei handelt es sich um eine aus zuvor genanntem Punkt resultierende Fehlerquelle.
  - Die Sensoren sind auf einem Halter befestigt und weisen eine Verkippung von circa 3° um die Y-Achse auf (vgl. Kapitel 7). Weitere Verkippungen um die anderen Achsen konnten noch nicht bestimmt werden.
  - Die Toleranz der Zahnhöhe des Referenzencoderrades ist mit  $\pm 0,1\text{mm}$  angegeben [15]. Tatsächlich wurden für das BMW 3er Encoderrad Abweichungen von 0,16mm und für das Golf 4 Encoderrad 0,09mm vom kürzesten zum längsten Zahn ermittelt (vgl. Kapitel 4).
  - Toleranzen der Verfahreinheiten des RMP
2. Kreuzspulenmessplatz
- Positionierungstoleranz beim Einstellen des Mittelpunktes sowohl in X-Y-Ebene als auch in der Höhe
  - Widerstandstoleranz der Shuntwiderstände zur Strommessung
  - Schwankungen der Versorgungsspannung der AMR-Messbrücke
  - Toleranzen der verwendeten Instrumentenverstärker
3. Allgemeine Toleranzen und Fehlerquellen
- Temperaturschwankungen bei der Messung haben einen unbestimmten Einfluss. In vorliegender Arbeit wird immer von Zimmertemperatur ausgegangen.
  - Exemplarabweichungen der verwendeten Sensoren

## 7 Auswertung der Syntheseergebnisse

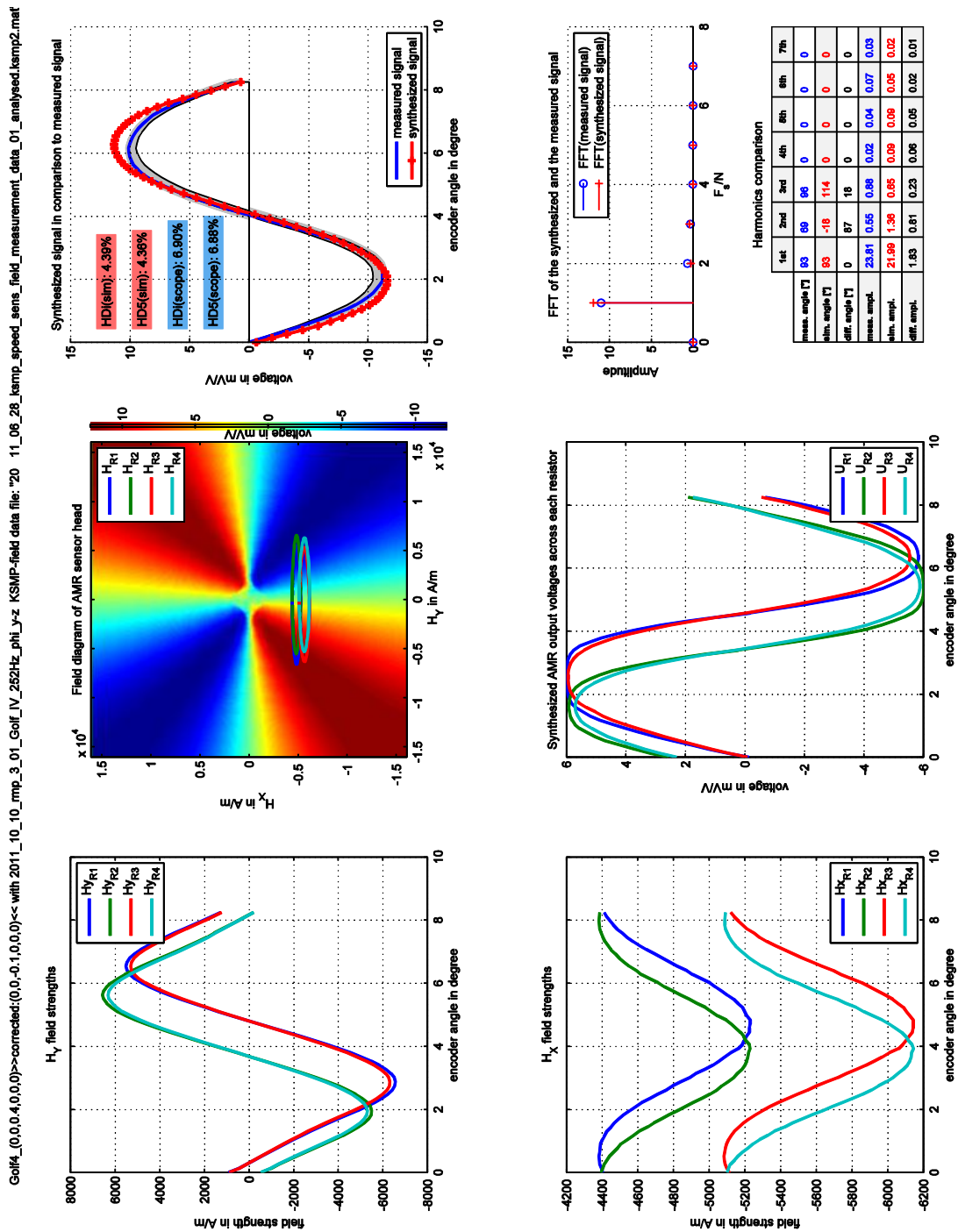
In diesem Kapitel werden zur Auswertung ausgesuchte Syntheseergebnisse dargestellt und die jeweiligen Merkmale erläutert. Dazu werden sechs Ergebnisgraphiken herangezogen, die als charakteristisch anzusehen sind, da sie die folgenden typischen Szenarien der Einbaulagen des Sensors aufweisen:

- Normal: Der Sensor ist in einem Abstand zu dem Encoderrad positioniert. Das Ausgangssignal hat hier eine Sinusform.
- Zu nah: Es tritt eine Verzerrung des Signals auf, sodass eine Oberwelle sichtbar sein sollte.
- Verkippung um die Z-Achse: Es tritt eine ungleichmäßige Verzerrung der Amplituden auf. Oberwellen sind sichtbar.
- Verkippung um die Y-Achse: Bei starker Verkippung tritt eine Frequenzverdopplung auf.
- Verkippung um die X-Achse: Es treten starke Oberwellen auf.
- Entfernte Einbaulage: Die Signalamplitude ist geringer als bei der normalen Einbaulage.

Diese Fälle sollen nun anhand der oben erwähnten Beispiele näher untersucht werden, damit die Ursache dieser Phänomene bestimmt werden kann. Bevor das erste Bild gezeigt wird, ist anzumerken, dass in den meisten eine Korrektur vorgenommen wurde. Dies bedeutet nicht, dass das Syntheseergebnis dadurch verfälscht wird. Die Korrektur wirkt sich nur auf die Wahl der Messergebnisse aus. Prinzipiell kann jedes Simulationsergebnis mit jedem beliebigen Messergebnis verglichen werden. Sinnvoll ist hier der Vergleich mit dem jeweils korrespondierenden. Dies bedeutet, dass beide Datensätze bei derselben Entfernung und mit derselben Verkippung erzeugt wurden. In einigen Fällen hat sich jedoch im Laufe der Vorabauswertung herausgestellt, dass zum einen das Modell des Stützmagneten nicht perfekt ist und zum anderen bei einigen Messungen der Sensor mit einem Verkippungswinkel von ca.  $3^\circ$  um die Y-Achse montiert wurde. Dieses muss hier bedacht und möglichst korrigiert werden. Im Fall der passiven Encoder bedeutet dies, dass ein Abstand von 0,1mm und ein Winkel von  $3^\circ$  abgezogen werden müssen. Im Fall des aktiven Encoders muss hingegen ein Abstand von 0,1mm hinzuaddiert werden. Somit bedarf es sowohl einer Verbesserung des Modells als auch einer des Messaufbaus.



Bild 7.1 zeigt das Beispiel einer normalen Einbaulage. Gewählt wurde hier der Golf 4 Encoder mit einem Abstand von 0,3mm ohne Verkippung.

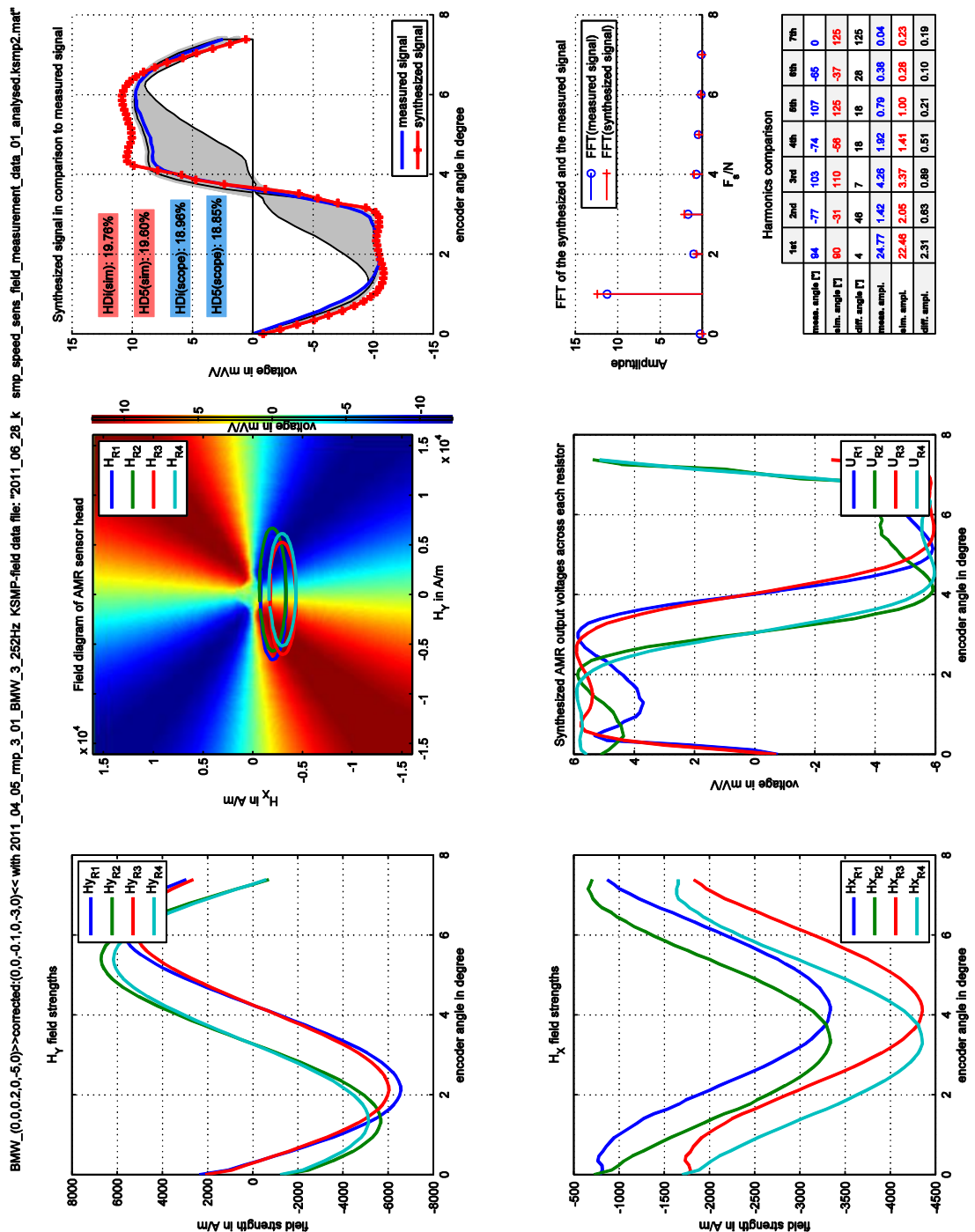


7.1: Synthesergebnis einer normalen Einbaulage

Zu erkennen ist, dass das Magnetfeld  $H_Y$  einen sinusförmigen Verlauf zeigt. Das Feld in X-Richtung ist um  $90^\circ$  phasenverschoben und weist einen cosinusförmigen Verlauf auf.  $H_X$  hat ein deutliches Offset, das auch durch die Verschiebung der Ellipsen nach unten zu erkennen ist. Die Ellipsen sind gleich groß und leicht gegeneinander verschoben. Der Vergleich des Synthese- mit dem Messergebnis zeigt, dass die Sinusform des

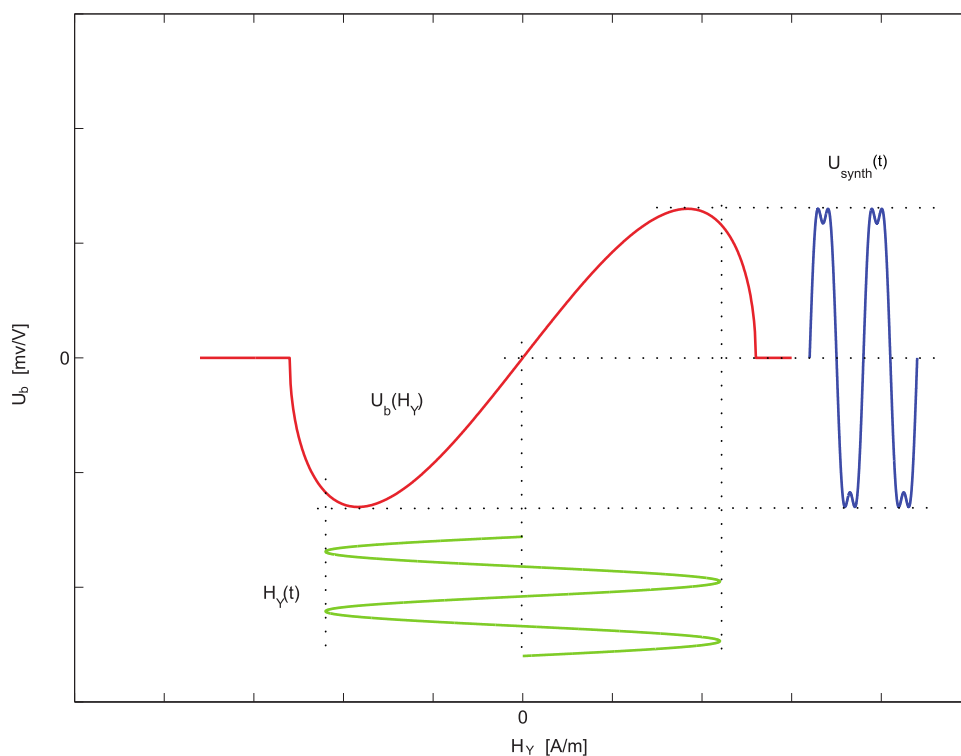
Messwertes gut nachgebildet wird. Eine Abweichung in der Amplitude ist deutlich sichtbar. Der Vergleich der HDIs- und HD5-Werte zeigt eine Abweichung von circa 2,5%. Die Abweichung der Amplituden kann ebenfalls in der FFT erkannt werden. Trotz der bestehenden Abweichung wird hier eine gute Übereinstimmung erzielt. Anhand des grauen Bereiches um den Messwert herum ist zu erkennen, dass die Messwertperioden keine deutlichen Unterschiede untereinander aufweisen.

Bild 7.2 zeigt den zweiten typischen Fall, den einer zu nahen Einbaulage.



7.2: Synthesergebnis bei zu geringem Abstand zwischen Sensor und Encoderrad

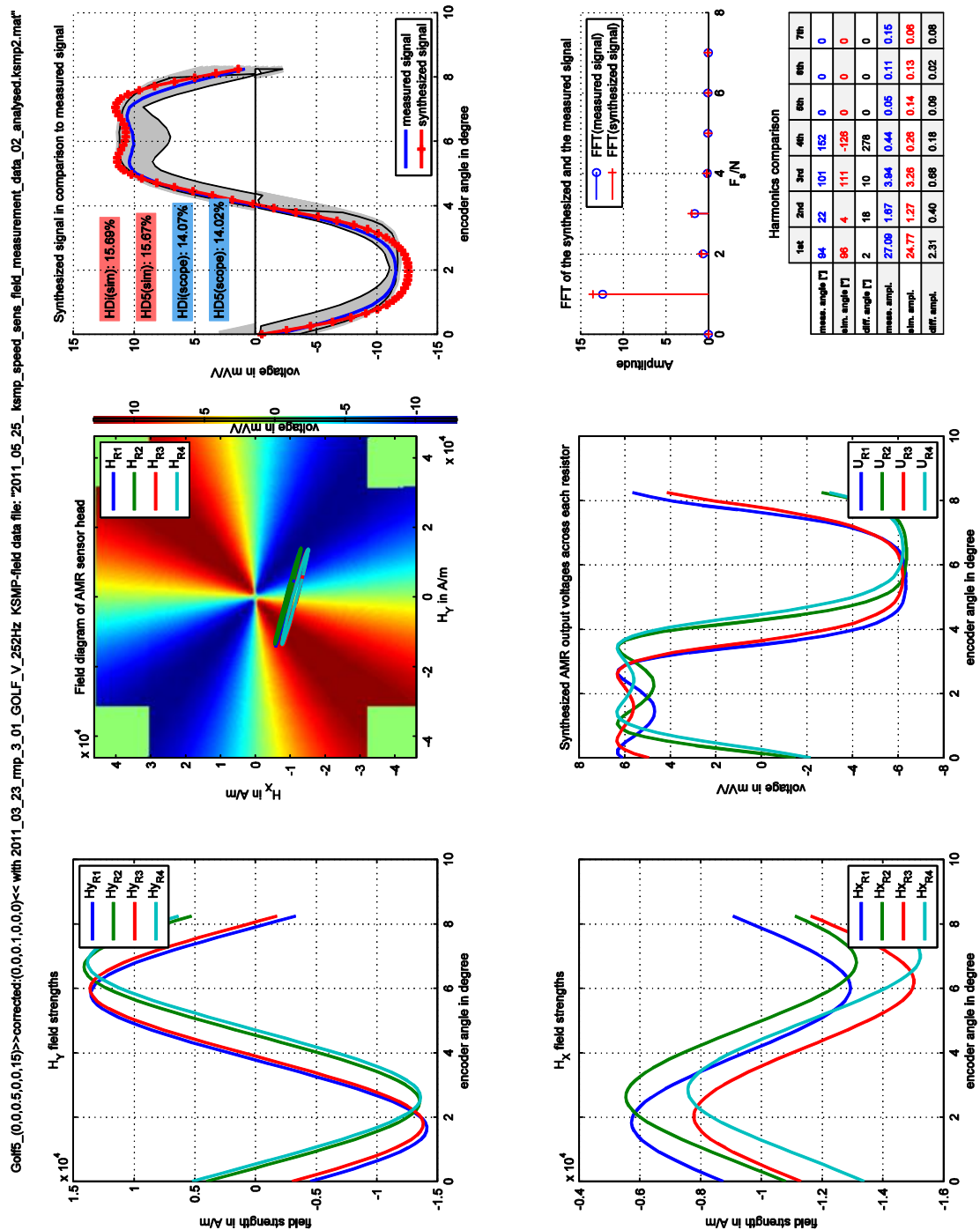
Hier ist das Beispiel des BMW 3er Encoders zu erkennen, bei dem der Abstand zwischen Sensor und Encoder 0,1mm beträgt. Zusätzlich ist eine leichte Verkippung um die Y-Achse gewählt worden. Beides führt zu einem ähnlichen Ergebnis. Im Vergleich zu vorherigem Synthesergebnis ist zu erkennen, dass die Amplitude des Feldes in Y-Richtung annähernd gleich geblieben ist. Allerdings ist  $H_X$  deutlich schwächer. Dies führt dazu, dass die Ellipsen näher zum Zentrum hinrücken und über das Maximum der Kennlinien hinausragen. Um dies zu verdeutlichen, zeigt Bild 7.3 eine Vereinfachung dieses Umstands. Zu beachten ist, dass das Signal hier nur an einer Kennlinie erzeugt wird und nicht, wie bei der Synthese im Kennfeld, an mehreren dieser Kennlinien (vgl. Bild 3.14).



7.3: Schematische Darstellung der Ursache einer verzerrten Brückenspannung nach [18]

In rot ist die Kennlinie des Sensors für eine Feldstärke  $H_X$ , in grün die Anregung  $H_Y$  und in blau die Brückenausgangsspannung dargestellt. Dem Bild ist zu entnehmen, dass ein zu starkes  $H_Y$ -Feld dazu führen kann, dass die erzeugte Brückenspannung wie dargestellt verzerrt wird. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass der Arbeitspunkt im linearen Bereich der Kennlinie eingestellt werden muss. Weiterhin gibt dies Aufschluss darüber, worin die Verzerrung der Brückenspannung eine ihrer Ursachen hat.

Bild 7.4 zeigt ein nur in einer Halbwelle stark verzerrtes Signal. Gezeigt wird das Beispiel des Golf 5 Encoderrades in einer Entfernung von 0,6mm und einer Verkippung von  $\varphi_z = 15^\circ$  um die Z-Achse.

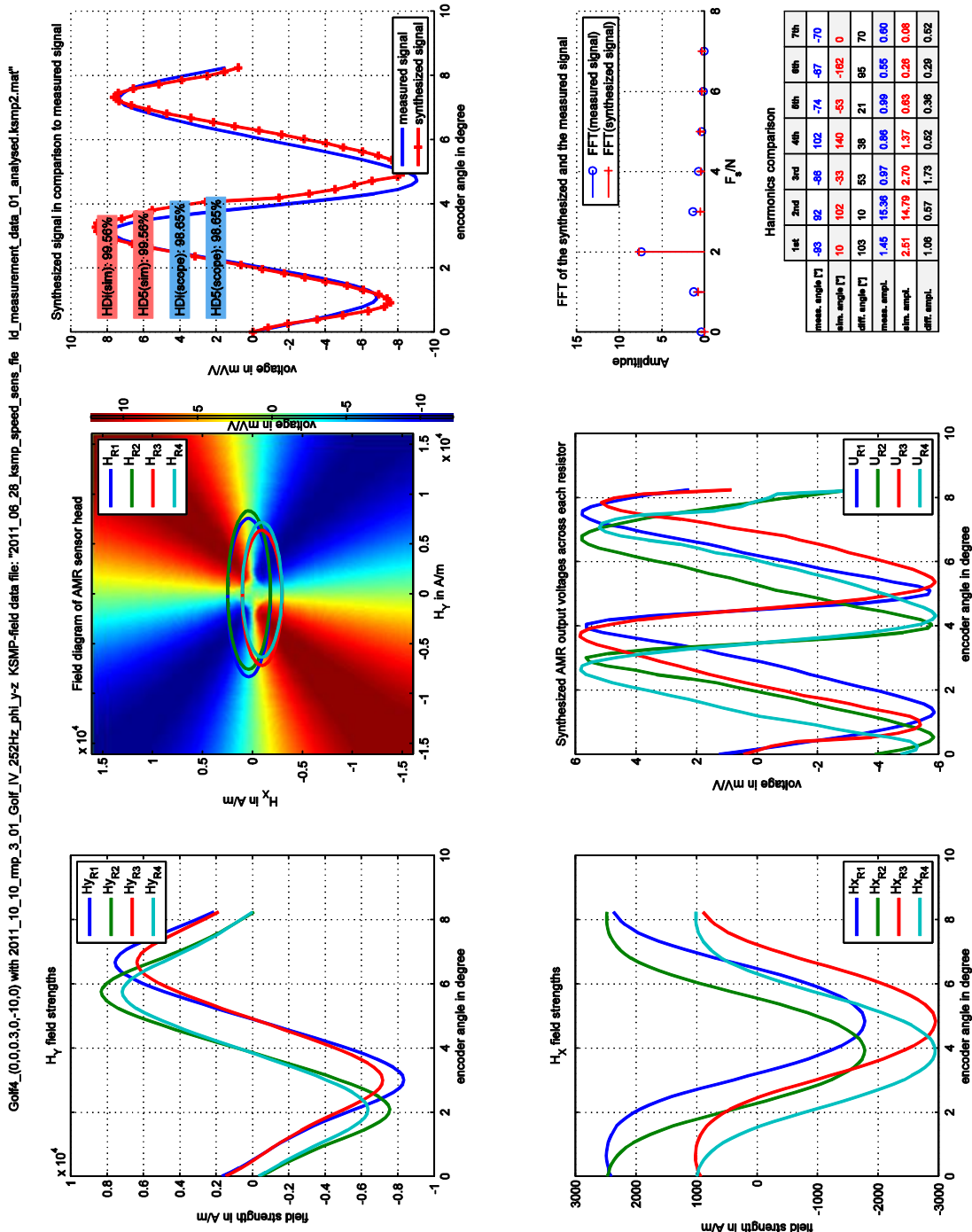


7.4: Syntheseergebnis bei Verkippung des Sensors um die Z-Achse

Die Feldstärken in Y-Richtung sind auf Grund der unterschiedlichen Encoderradtypen nicht vergleichbar. Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass die Phasenverschiebung zwischen  $H_x$  und  $H_y$  eine andere ist. Dadurch ergibt sich eine Schrägstellung der Ellipsen im Kennfeld und eine Verzerrung nur einer der Halbwellen. Im Vergleich mit

den Messergebnissen liefert die Synthese ein gutes Ergebnis. Dennoch bleibt eine Abweichung der Amplitude vorhanden.

Bild 7.5 zeigt die Auswirkung einer starken Verkippung um die Y-Achse bei einem Golf 4 Encoderrad.

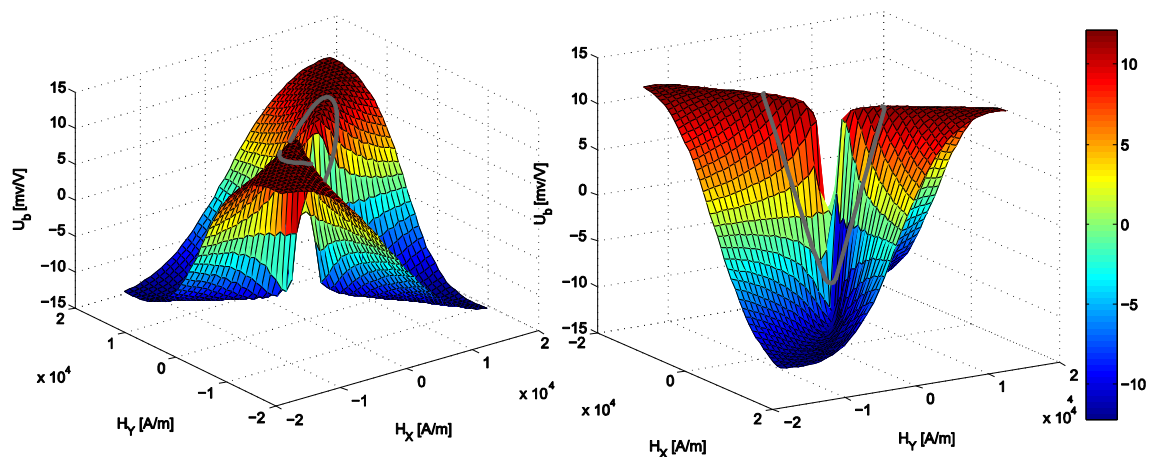


7.5: Syntheseergebnis bei starker Verkippung des Sensors um die Y-Achse

Der Abstand beträgt hier 0,3mm und der Verkippungswinkel  $\varphi_Y = -10^\circ$ . Der graue Bereich um die gemessene Brückenspannung wird hier nicht angezeigt, um eine bessere Übersichtlichkeit zu erhalten. Die Amplituden der Felder  $H_Y$ , der Widerstände  $R_1$  und

$R_2$  sind jeweils um circa 15% kleiner als die der verbleibenden beiden Widerstände, was sich in der unterschiedlichen Breite der Ellipsen zeigt. Außerdem haben die Felder in X-Richtung eine stärkere Amplitude, wodurch sich die Ellipsen öffnen. Weil  $H_X$  sowohl positive als auch negative Anteile hat, bilden sich die Ellipsen um das Zentrum des Kennfeldes aus. Somit ergibt sich eine Verdopplung der Frequenz, da die positive und die negative Amplitude in dem Kennfeld zweimal überstrichen werden. Ein solches Verhalten ist anhand einer einzigen Kennlinie (vgl. Bild 7.3) nicht zu erklären. Damit stellt dieses Verfahren eine Neuheit dar.

Bild 7.6 verdeutlicht schematisch den Verlauf der Ellipse innerhalb eines in dreidimensionaler Darstellung gezeichneten Kennfeldes.



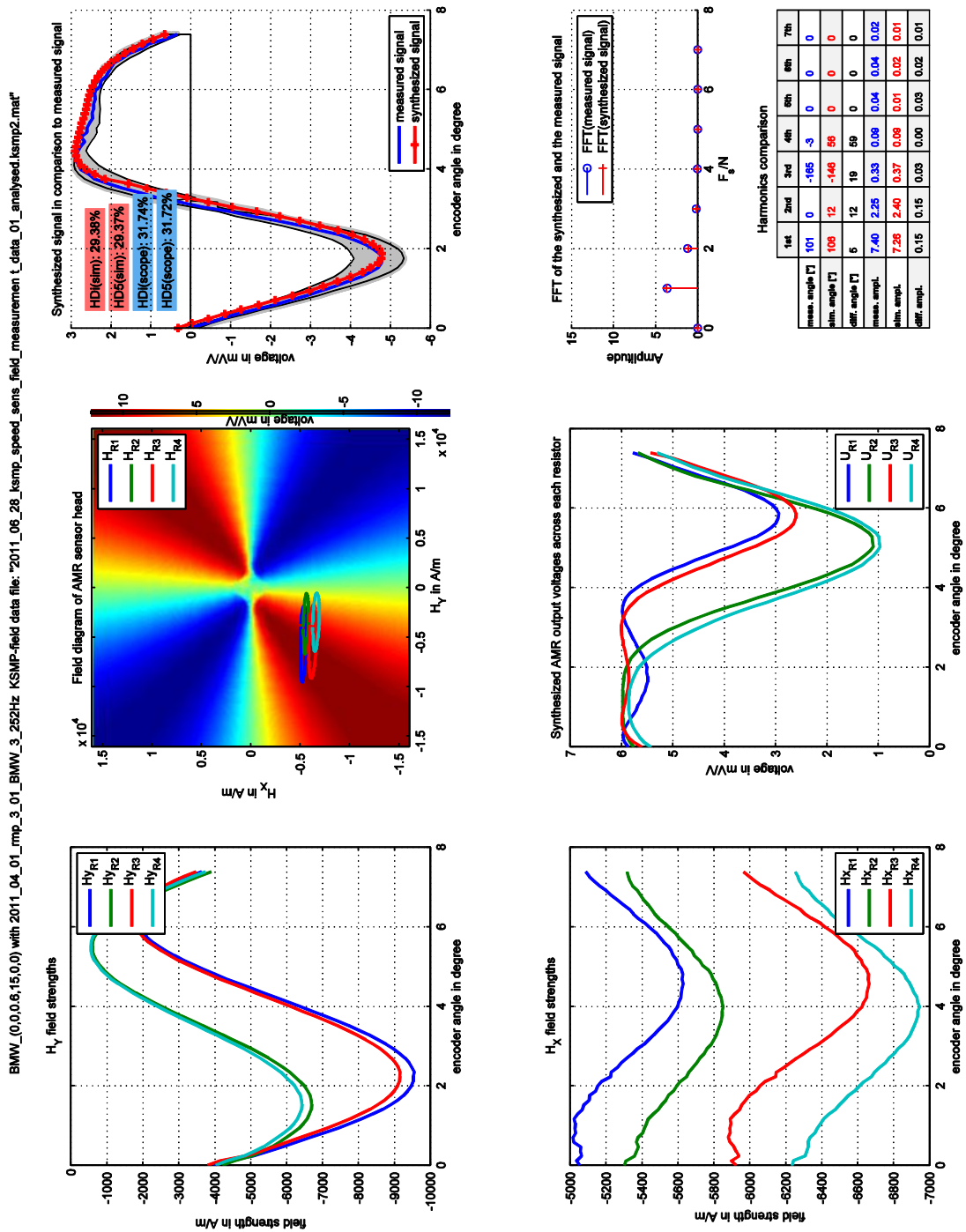
7.6: Schematische Darstellung einer Ellipse im 3D-Kennfeld

Zu erkennen ist, dass sowohl der negative blaue Teil des Kennfeldes (negative Amplituden der Brückenspannung) als auch der positive rote Teil des Kennfeldes (positive Amplituden der Brückenspannung) zweimal überstrichen werden.

Der Vergleich der Synthese- mit den Messergebnissen in Bild 7.5 zeigt eine gute Übereinstimmung. Eine Korrektur der Entfernung konnte auf Grund nicht vorhandener Messergebnisse in diesem Bereich nicht durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass das Ergebnis noch verbessert werden kann, wenn ein korrigiertes Modell verwendet oder eine neue Simulation durchgeführt wird, die dies berücksichtigt. Der Vergleich der HDs zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der FFTs wieder.

Als nächstes folgt ein Beispiel für eine Verkippung um die X-Achse. Das Ergebnis ist in Bild 7.7 dargestellt. Hierfür dient das BMW 3er Encoderrad mit einem Abstand von 0,6mm zum Encoder.

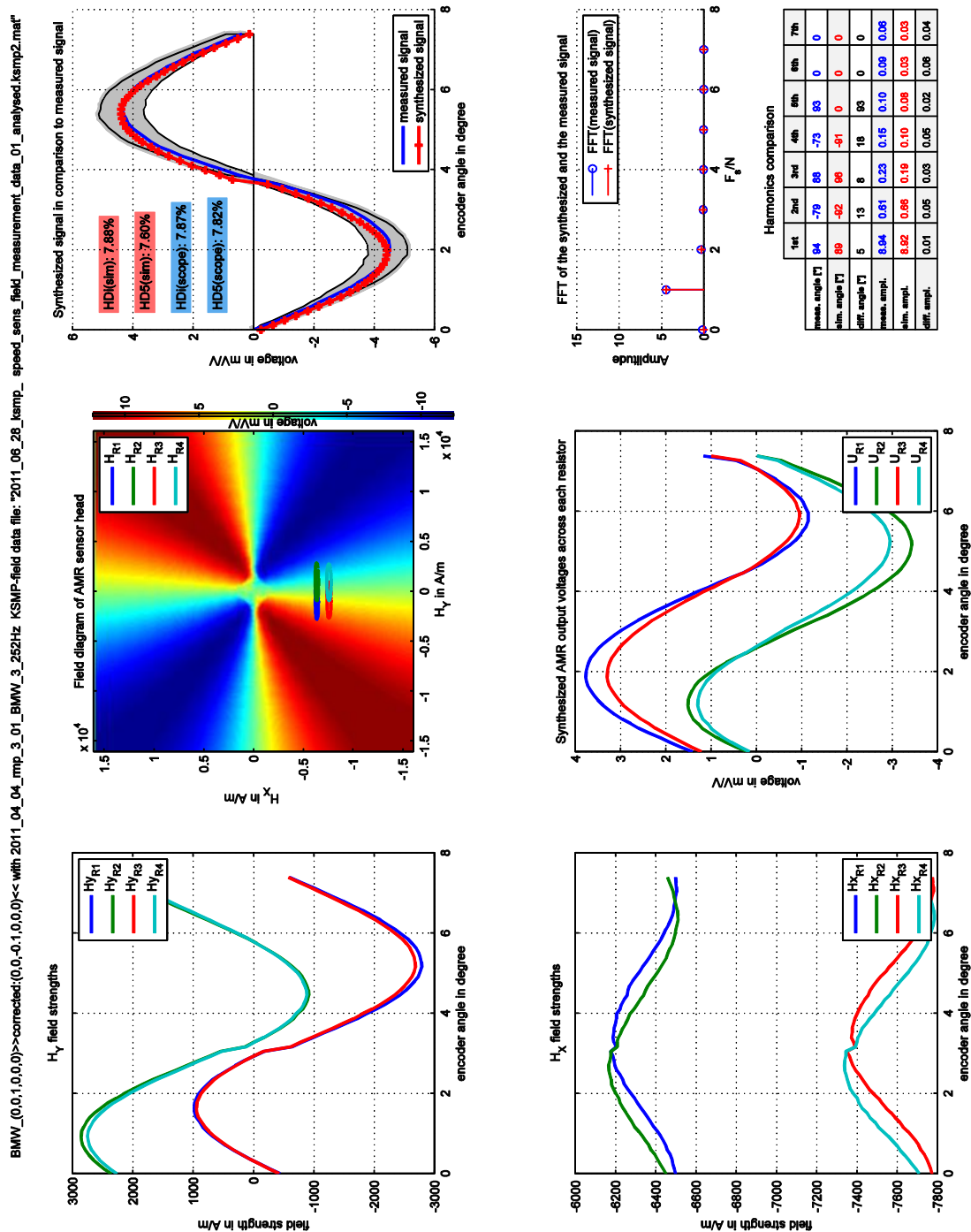




7.7: Syntheseergebnis bei starker Verkippung des Sensors um die X-Achse

Am auffälligsten ändern sich hier die Feldstärken in Y-Richtung, da diese nur noch im negativen Bereich sind. Außerdem unterscheiden sich auch die Amplitudenpaare untereinander. Der Hauptunterschied besteht darin, dass  $H_{Y_{R1}}$  und  $H_{Y_{R3}}$  circa 30% negativer werden und zudem einen leicht negativeren Offset aufweisen. Zudem bewirkt die höhere Amplitude bei  $H_{Y_{R1}}$  und  $H_{Y_{R3}}$  eine breitere Ellipse (blau und rot). Aus diesem Grund wird hier das Maximum der Spannung im Kennfeld zu einer Seite hin überschritten und die charakteristische Verzerrung bildet sich entsprechend einseitig aus (vgl. Bild 7.3). Die Feldstärken in X-Richtung werden nicht wesentlich beeinflusst.

Weiterhin ist erneut eine Phasenverschiebung zwischen  $H_x$  und  $H_y$  zu erkennen. Dies begünstigt, wie bereits erwähnt, die Verzerrung in einer der Halbwellen. Dies ist auch an dem deutlichen Anteil der zweiten Harmonischen in der FFT zu erkennen. Da das Synthesergebnis in der Mitte des grauen Bereichs liegt, ist hier eine sehr gute Übereinstimmung erreicht. Als letzter typischer Fall folgt eine Sensorpositionierung in einem größeren Abstand. Dies ist in Bild 7.8 dargestellt. Hierfür dient der BMW 3er Encoder in einer Entfernung von 0,9mm zum Sensor.



7.8: Synthesergebnis bei entfernterer Einbaulage

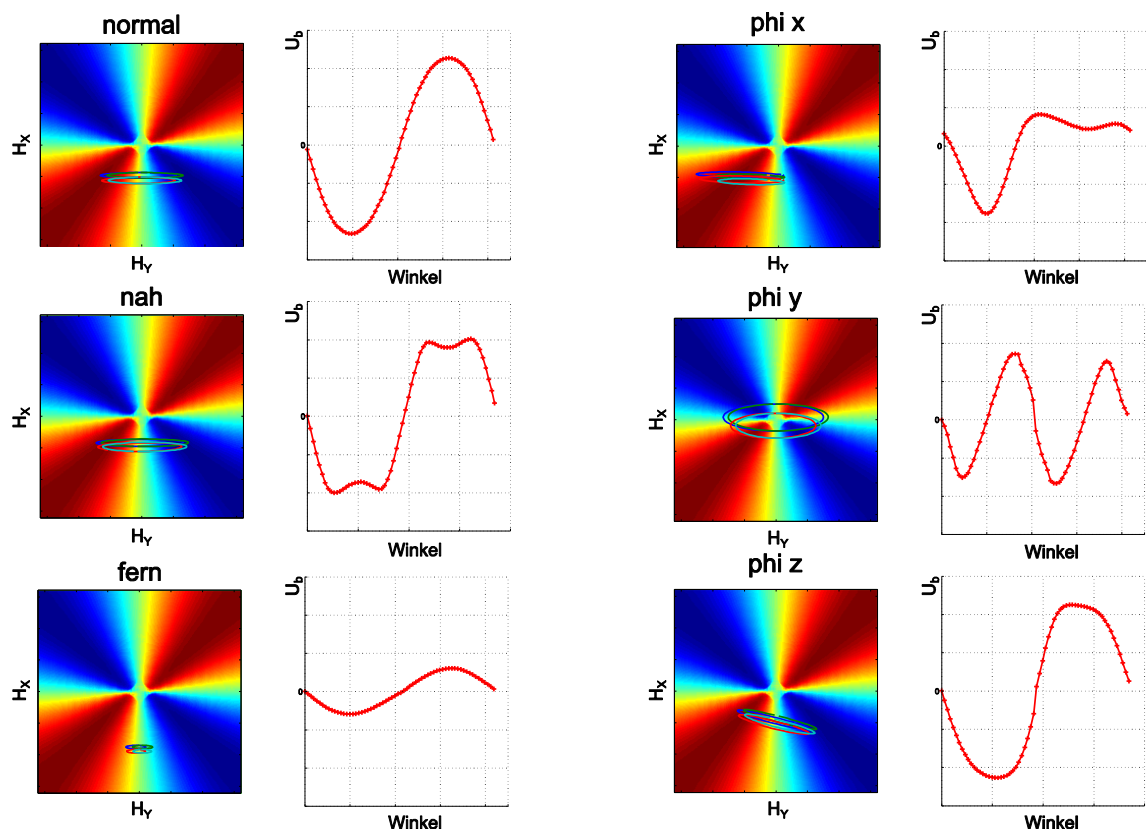


Zu erkennen ist, dass die Amplituden der Magnetfelder kleiner sind als die in einer dichteren Einbaulage. Zwischen den Feldstärkepaaren  $H_{Y_{R1,R3}}$  und  $H_{Y_{R2,R4}}$  stellt sich eine Phasenverschiebung ein. Dies äußert sich in einem zunehmenden Abstand auf der X-Achse ( $H_Y$ -Achse) zwischen den Ellipsen im Kennfeld. Die Amplitude des Feldes  $H_X$  ist kleiner als die in einer dichteren Einbaulage, wodurch die Ellipsen flacher sind. Das Syntheseergebnis zeigt auch hier eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der gemessenen Brückenspannungen. An dem grauen Bereich um das Ergebnis herum ist zu erkennen, dass sich ein Unrundlauf des Encoderrades beziehungsweise Schwankungen in der Höhe der Encoderzähne bei einem größerem Abstand zwischen Sensor und Encoder stärker auswirken als bei einem kleineren Abstand.

## 8 Fazit und Ausblick

Um das Verhalten des Sensorausgangssignals charakterisieren zu können, war es bislang nötig, das physische Teilsystem aus ABS-Sensor und Encoderrad auf einem Radmessplatz zu vermessen. In dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren nach [14] angewendet, das anstelle der Messung die Simulation des Sensor-Encoderrad-Systems vorsieht. Dafür wurden zunächst die drei wesentlichen Schritte Vermessung der Sensoren, magnetostatische Simulation des Sensor-Encoderrad-Systems sowie Synthese des Sensorausgangssignals durchgeführt. In der abschließenden Auswertung zeigte ein Vergleich der synthetisierten mit den gemessenen Ausgangsspannungen der AMR-Messbrücke gute Übereinstimmungen. Damit kann festgehalten werden, dass dieses Teilsystem ebenso mit Hilfe einer Simulation konstruiert werden kann.

Bei den in der Auswertung dargestellten und erläuterten Auswertungsbeispielen einiger Synthese- und Messergebnisse handelt es sich im Wesentlichen um sechs typische Signalformen, die in Bild 8.1 zusammenfassend dargestellt werden.



8.1: Zusammenfassung typischer Kurvenverläufe der Brückenausgangsspannung

Die Übereinstimmung der Ergebnisse der gemessenen mit denen der synthetisierten Signale ist grundsätzlich zwar als gut zu bewerten, allerdings haben sich einige Schwächen gezeigt. Hinsichtlich der Aufnahme der Messwerte am Radmessplatz konnte mit Hilfe des Syntheseverfahrens eine Abweichung des Verkippungswinkels  $\varphi_Y$  festgestellt werden. Dies wurde durch eine Vergleichsmessung bestätigt. Weiterhin zeigte sich, dass die erstellten Simulationsmodelle noch nicht exakt sind. Aus diesem Grund müssen Korrekturen bei der Wahl der Messergebnisse durchgeführt werden. Diese sind jedoch konstant, was bedeutet, dass es sich hierbei um eine systematische Abweichung handelt. Eine weitere Untersuchung zu diesem Thema kann diese Abweichung beheben. Schließlich sollte auch die Simulationszeit optimiert werden. Um diese zu reduzieren, kann auch bei den passiven Encoderrädern ein Material gewählt werden, welches ein konstantes  $\mu_r$  aufweist. Tests mit dem Golf 4 Encoder und der Permeabilität  $\mu_r = 650$  zeigen eine sehr gute Annäherung an das Ergebnis, bei dem ST37 als Material gewählt wurde. Auf diese Weise kann die Rechenzeit für einen Schritt von  $\approx 35$ min auf  $\approx 20$ min reduziert werden, was einer Reduzierung um gut 40% entspricht.

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es in Zukunft möglich, neue Encoderradstrukturen zu charakterisieren und auf ihre Tauglichkeit hin zu testen, ohne diese erst fertigen zu müssen. Ferner können hiermit in Zukunft neue Sensorstrukturen, die auf dem AMR-Effekt beruhen, entwickelt werden. So könnte zum Beispiel eine andere Anordnung der magnetoresistiven Flächen innerhalb des Sensorgehäuses untersucht werden. Außerdem kann der KSMP mit dem neu konstruierten KSpK dazu genutzt werden, weitere Sensortypen, die auf dem AMR-Effekt aufbauen, zu vermessen.

Die Firma NXP Semiconductors GmbH hat darauf hingewiesen, dass die Kennfelder der AMR-Widerstände auch berechnet werden können, indem Gl. (2.43) durch zum Beispiel Anwendung des Newtonverfahrens gelöst und das Ergebnis in Gl. (2.31) eingesetzt wird [24]. Eine erste Betrachtung der Rechenergebnisse scheint vielversprechend und sollte daher weiter untersucht werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Robert Bosch GmbH, *Sicherheits- und Komfortsysteme*, 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH: Wiesbaden, 2004
- [2] Tipler, P. A., Mosca, G., *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, 2009
- [3] Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J., *Physik*, 2. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KgaA: Weinheim, 2009
- [4] Kuypers, F., *Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2: Elektrizität, Optik und Wellen*, 2. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KgaA: Weinheim, 2003
- [5] Schoermer, C., *AMR-Messbrücken für ABS-Sensoren*, Studienarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2008
- [6] Dibbern, U., Magneto-resistive Sensors. In: *Sensors - A Comprehensive Survey*, W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel (Hrsg.). In: Vol. 5 Magnetic Sensors, R. Boll, J. Overshott (Hrsg.), VCH Verlagsgesellschaft mbH: Weinheim 1991
- [7] Philips Semiconductors, *KMI18/2 Integrated rotational speed sensor*, Data Sheet, 05.09.2000
- [8] Philips Semiconductors, *KMI22/1 Rotational speed sensor for extended air gap application and direction detection*, Data Sheet, 04.09.2000
- [9] Philips Semiconductors, *Semiconductor Sensors*, Data Handbook SC17, 2001
- [10] Piorek, M., *Hard- und Software eines Messplatzes zur Harmonischenanalyse bei magnetischen Sensoren*, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 24.03.2011
- [11] Siebenmorgen, F., *Ansteuerelektronik und Mikrocontrollersteuerung eines Kreuzspulennessplatzes für ABS-Sensoren*, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 04.06.2009
- [12] Wicki, S., *Berechnung der Spulen*, Fachhochschule Aargau für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, 10.07.2000
- [13] Krey, M. & Riemschneider, K.-R., Signalverarbeitung zur Funktionsdiagnose bei magnetischen Sensoren, *E-Forum Magazin des Departments Informations- und Elektrotechnik* und pers. Kommunikation, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2011
- [14] Krey, M. & Riemschneider; K.-R., Diagnose von magnetischen Drehzahlsensoren durch fortlaufende Harmonischen-Analyse mit minimaler Hardware, *Tagungsband Internationales Forum Mechatronik*, Cluster Mechatronik & Automation e.V., Cham, 22.09.2011

- 
- [15] Philips Semiconductors, *KMI16/1 Integrated rotational speed sensor*, Data Sheet, 05.09.2000
  - [16] Ivanov, K., *Fehlersichere Automatisierung eines Encoder-Messplatzes zur Untersuchung von ABS-Sensoren*, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 12.08.2011
  - [17] Schoermer, C., *Konstruktion und Automatisierung eines Radmessplatzes für ABS mit Encodern verschiedener Automobil-Hersteller*, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 07.01.2011
  - [18] Jegenhorst, N., *Entwicklung eines Controllersystems zur Zustandserkennung von ABS-Sensoren*, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 23.10.2009
  - [19] Poppinga, H., *Controller-Implementation und messtechnische Erprobung der Signalverarbeitung für die Diagnosefunktion von ABS-Sensoren*, Bachelorthesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 20.04.2011
  - [20] Koch, L., *Aufwandsminimierte Schätzung von Harmonischen zur Zustandsbestimmung von ABS-Sensoren*, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 21.04.2010
  - [21] Ida, N. & Bastos, J. P. A., *Electromagnetics and Calculation of Fields*, 2. Auflage, Springer-Verlag: New York, 1997
  - [22] Stahl, M., *Controllersystem zur Verstärkungsregelung und Offsetkompensation für ABS-Sensoren mit Diagnosefunktion*, Bachelorthesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 26.02.2010
  - [23] Krey, M., Riemschneider, K.-R., Zippel, S., *Signal Synthesis for Magnetoresistive Speed Sensors based on Field Simulations combined with Measured Sensor Characteristic Diagrams*, IEEE I2MTC - International Instrumentation and Measurement Technology Conference 2012, Paper submitted
  - [24] Preisner, T., *Persönliche Kommunikation zur Simulation und Signalsynthese*, 2011

## **Anhang A Mess- und Simulationsergebnisse**

Dieser Anhang stellt lediglich einen Auszug der erstellten Ergebnisgraphiken vor. Alle weiteren Ergebnisgraphiken sowie die hierfür zu Grunde liegenden CST Simulationsergebnisse liegen bei Prof.-Dr. Ing. Karl-Ragmar Riemschneider an der HAW in Form einer CD vor.

### **Abbildungsverzeichnis zu Anhang A**

A 1: Ergebnis der Encodervermessung mit einem 3D-Gaussmeter, ganze Umdrehung in geringer Auflösung .....	116
A 2: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des BMW 3er Encoders bei Verkippung um die X-Achse nach [16] .....	117
A 3: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des BMW 3er Encoders bei Verkippung um die Y-Achse nach [16], Markierung in rechter Pyramide kennzeichnet den Bereich der Synthese.....	118
A 4: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des BMW 3er Encoders bei Verkippung um die Z-Achse nach [16] .....	119
A 5: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 4 Encoders bei Verkippung um die X-Achse nach [16] .....	120
A 6: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 4 Encoders bei Verkippung um die Y-Achse nach [16], Markierung in rechter Pyramide kennzeichnet den Bereich der Synthese .....	121
A 7: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 4 Encoders bei Verkippung um die Z-Achse nach [16] .....	122
A 8: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 5 Encoders bei Verkippung um die X-Achse nach [16] .....	123
A 9: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 5 Encoders bei Verkippung um die Y-Achse nach [16] .....	124
A 10: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 5 Encoders bei Verkippung um die Z-Achse nach [16] .....	125
A 11: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0mm.....	126
A 12: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.1mm.....	127

---

A 13: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von $-10^\circ$ um die Y-Achse .....	128
A 14: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.4mm.....	129
A 15: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von $-15^\circ$ um die X-Achse .....	130
A 16: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $-15^\circ$ um die Z-Achse.....	131
A 17: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $-5^\circ$ um die Y-Achse .....	132
A 18: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $-10^\circ$ um die Y-Achse .....	133
A 19: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $15^\circ$ um die Y-Achse .....	134
A 20: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $15^\circ$ um die X-Achse .....	135
A 21: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von $-10^\circ$ um die Y-Achse .....	136
A 22: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von $-13^\circ$ um die Y-Achse .....	137
A 23: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von $-5^\circ$ um die Y-Achse .....	138
A 24: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von $-10^\circ$ um die Y-Achse .....	139
A 25: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0mm und einer Verkippung von $40^\circ$ um die Z-Achse.....	140
A 26: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm .....	141
A 27: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm .....	142
A 28: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $-5^\circ$ um die Y-Achse .....	143
A 29: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $-10^\circ$ um die Y-Achse .....	144
A 30: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von $-15^\circ$ um die Y-Achse .....	145

---

A 31: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.4mm und einer Verkippung von $13^\circ$ um die X-Achse .....	146
A 32: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm .....	147
A 33: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von $-5^\circ$ um die X-Achse .....	148
A 34: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm .....	149
A 35: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von $15^\circ$ um die Z-Achse .....	150
A 36: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von $-15^\circ$ um die Z-Achse .....	151
A 37: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.4mm .....	152
A 38: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm .....	153
A 39: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von $-15^\circ$ um die Z-Achse .....	154
A 40: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von $13^\circ$ um die Y-Achse .....	155
A 41: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von $15^\circ$ um die Y-Achse .....	156
A 42: Ergebnis des Tests eines Syntheseergebnisses auf Plausibilität .....	157



A-Tabelle 1: Ergebnisse der BMW 3er Encoderrad-Vermessung mit Messuhr

Zahn	Abweichung [10 $\mu$ m]	Zahn	Abweichung [10 $\mu$ m]	Zahn	Abweichung [10 $\mu$ m]
1	1	2	1,5	3	0,5
4	0	5	1	6	1
7	2,5	8	3	9	3
10	3	11	5	12	6
13	7	14	8	15	9,5
16	10,5	17	12	18	13
19	13	20	14	21	15
22	16	23	16,5	24	15,5
25	15	26	15,5	27	15
28	15,5	29	15	30	14
31	14	32	15	33	13,5
34	14	35	14,5	36	13
37	12,5	38	11	39	10
40	11	41	8	42	7
43	7	44	5	45	3
46	2,5	47	2	48	2
49 == 1	1				

A-Tabelle 2: Ergebnisse der Golf 4 Encoderrad-Vermessung mit Messuhr

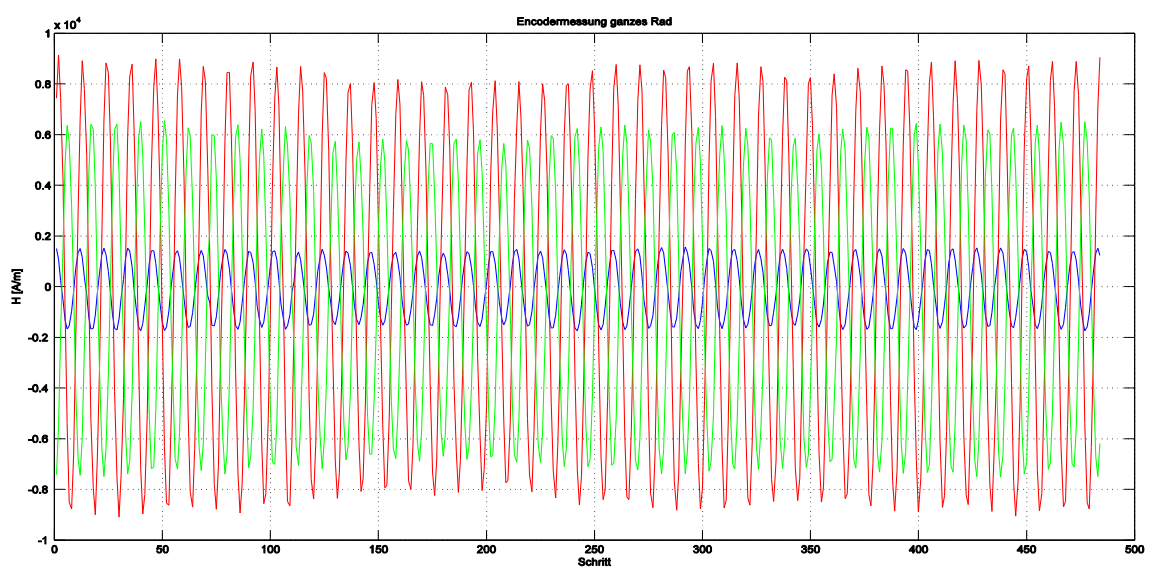
Zahn	Abweichung [10 $\mu$ m]	Zahn	Abweichung [10 $\mu$ m]	Zahn	Abweichung [10 $\mu$ m]
1	6	2	6	3	8
4	9	5	8	6	7
7	8	8	7	9	8
10	7	11	6	12	6
13	6	14	5	15	7
16	6	17	7	18	8
19	4	20	4	21	2
22	2	23	1	24	0
25	2	26	3	27	2
28	3	29	4	30	5
31	6	32	5	33	6
34	6	35	4	36	4
37	4	38	5	39	8
40	6	41	5	42	5
43	6	44==1	6		

A-Tabelle 3: Simulationsplan der passiven Encoderräder BMW 3er und Golf 4

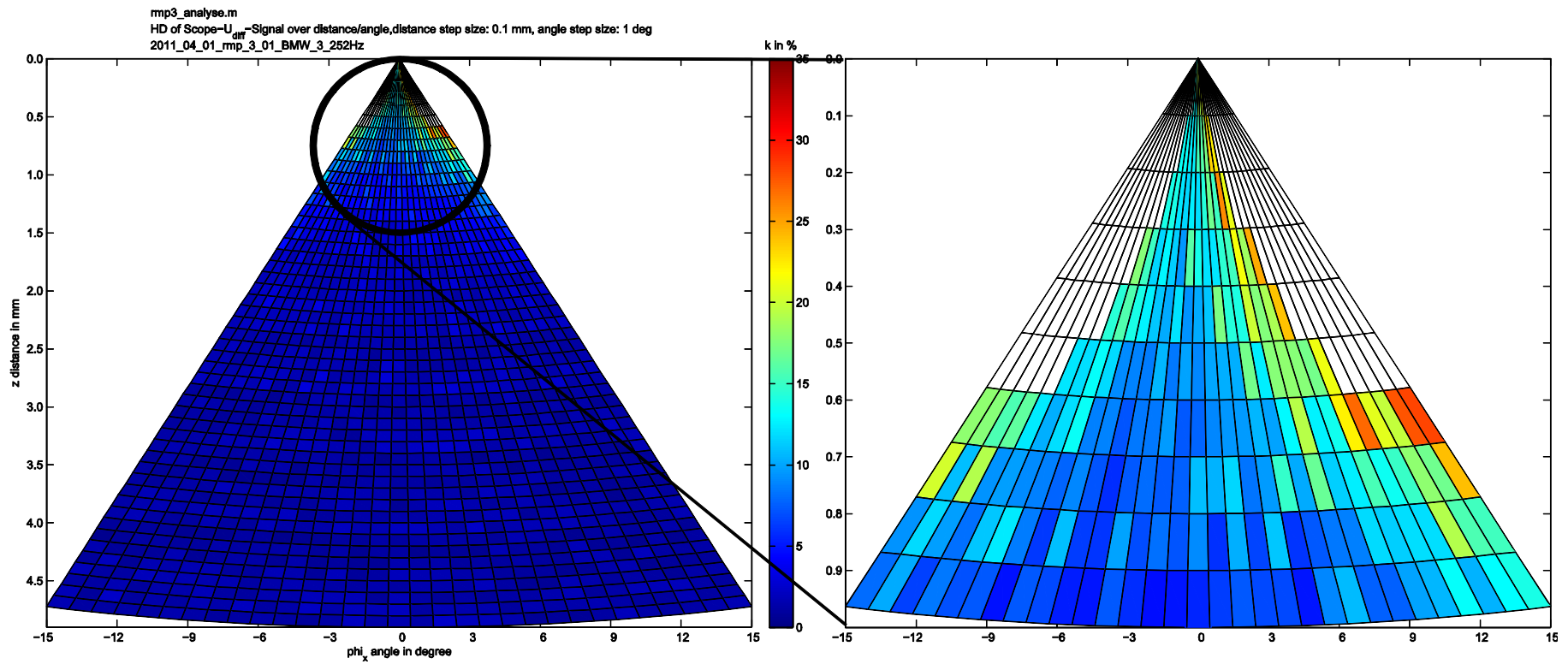
BMW3er					Golf 4				
Nr.	Distanz [mm]	phi_x [°]	phi_y [°]	phi_z [°]	Nr.	Distanz [mm]	phi_x [°]	phi_y [°]	phi_z [°]
1	0,1				1	1			
2	0,5				2	0,5	0		
3	1				3	0,5	15		
4	2,5				4	0,4	0		
5	5				5	0,4	13		
6	0,6	15			6	0,4	-13		
7	0,6	-15			7	1		-15	
8	1	15			8	0,2		7	
9	0,2		-9		9	0,3		-10	
10	0,2		-10		10	0,3		-13	
11	0,2		-11		11	0,4		15	
12	0,2		-14		12	0,4		-15	
13	1		15		13	0,1			40
14	0,2			15	14	0,1			-40
15	0,2			-15					
16	1			-15					

A-Tabelle 4: Simulationsplan des Golf5 Encoderradmodells

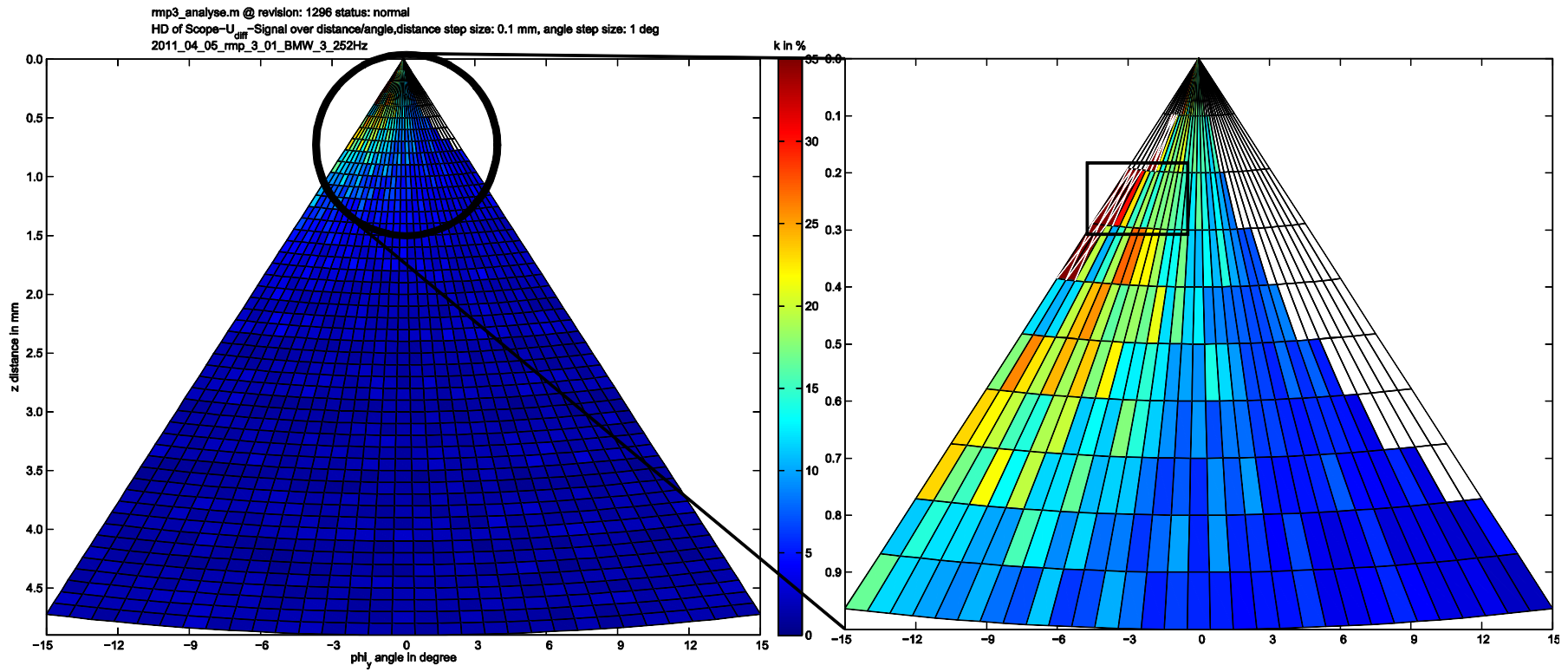
Golf5				
Nr.	Distanz [mm]	phi_x [°]	phi_y [°]	phi_z [°]
1	0,1			
2	0,3			
3	0,5			
4	1			
5	2			
6	0,1	-5		
7	0,5	-13		
8	0,2	0		
9	0,2	7		
10	0,2	-7		
11	0,2		-10	
12	0,5		15	
13	0,5		13	
14	0,2		7	
15	0,2		-7	
16	0,2		-15	
17	0,5			15
18	0,5			-15
19	0,2			15
20	0,2			7
21	0,2			-7
22	0,2			-15



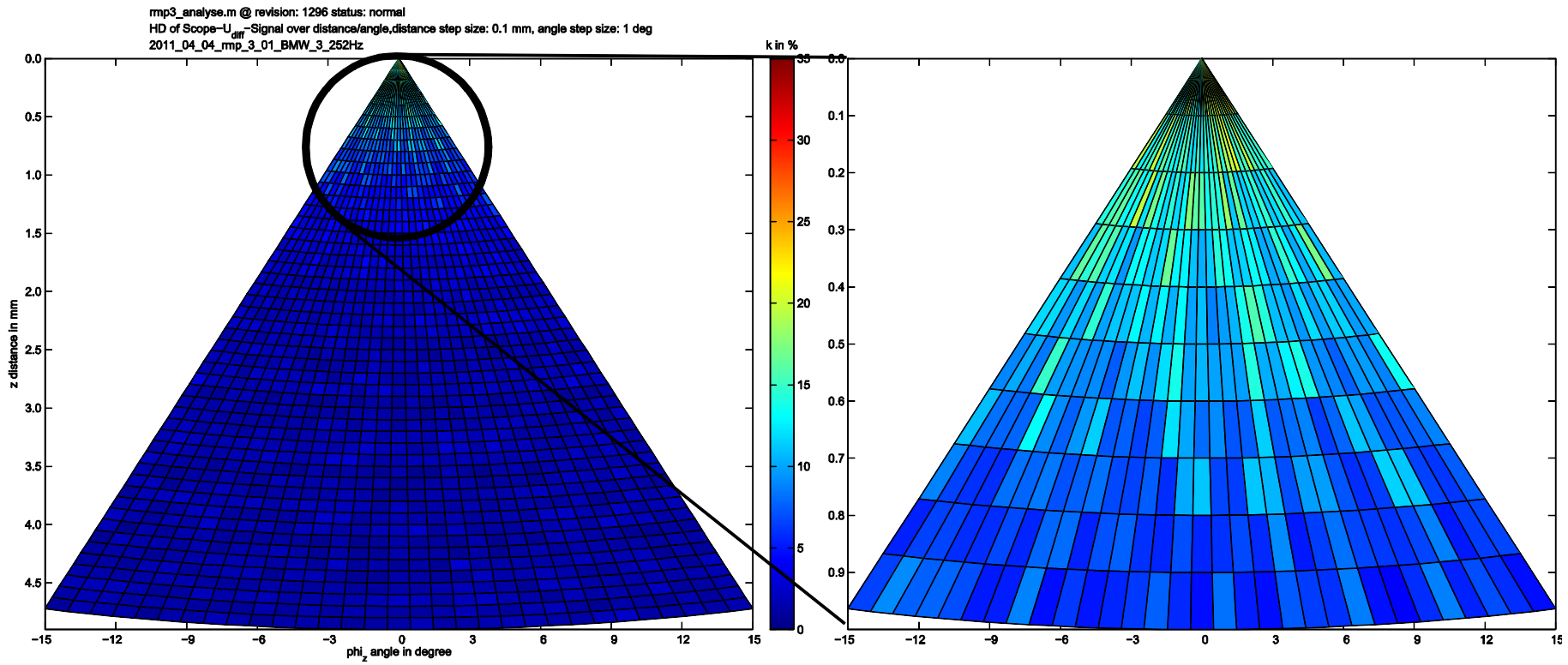
A 1: Ergebnis der Encodermessung mit einem 3D-Gaussmeter, ganze Umdrehung in geringer Auflösung



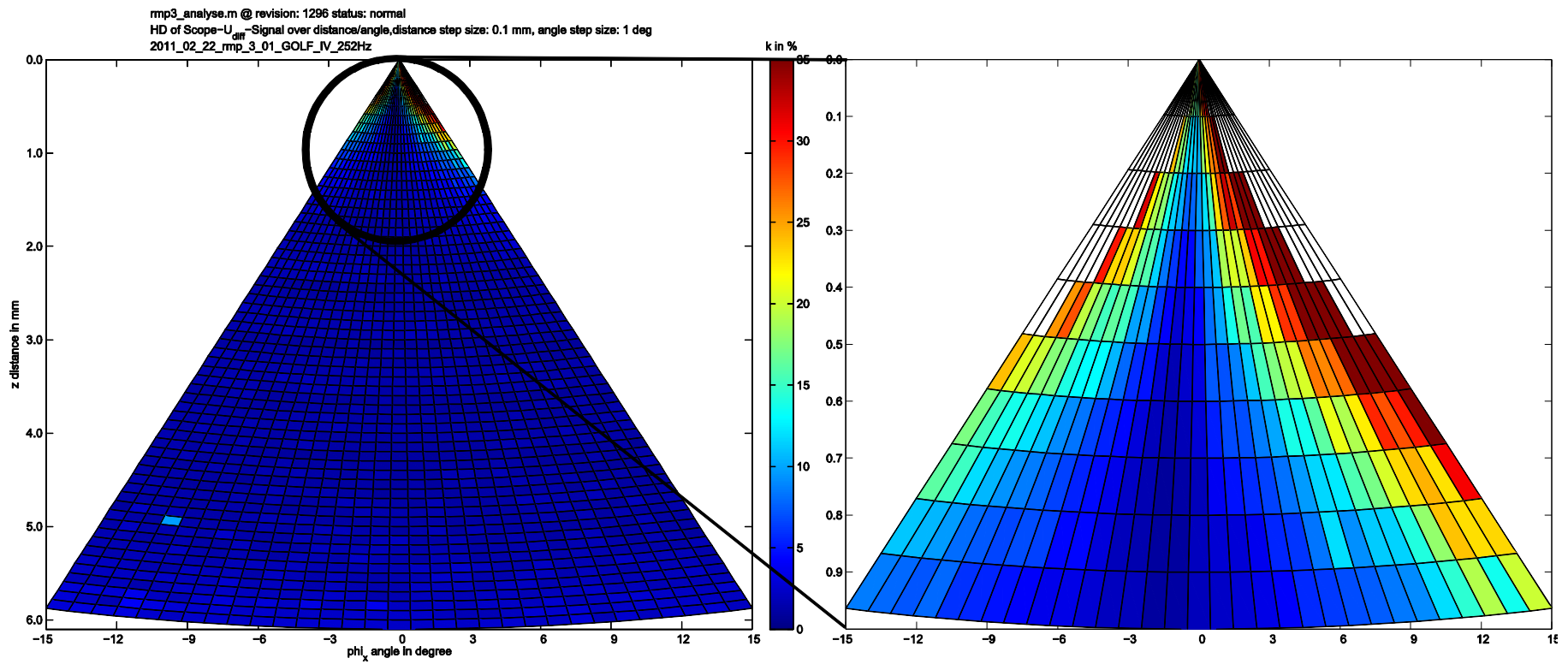
A 2: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des BMW 3er Encoders bei Verkippung um die X-Achse nach [16]



A 3: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des BMW 3er Encoders bei Verkipfung um die Y-Achse nach [16], Markierung in rechter Pyramide kennzeichnet den Bereich der Synthese

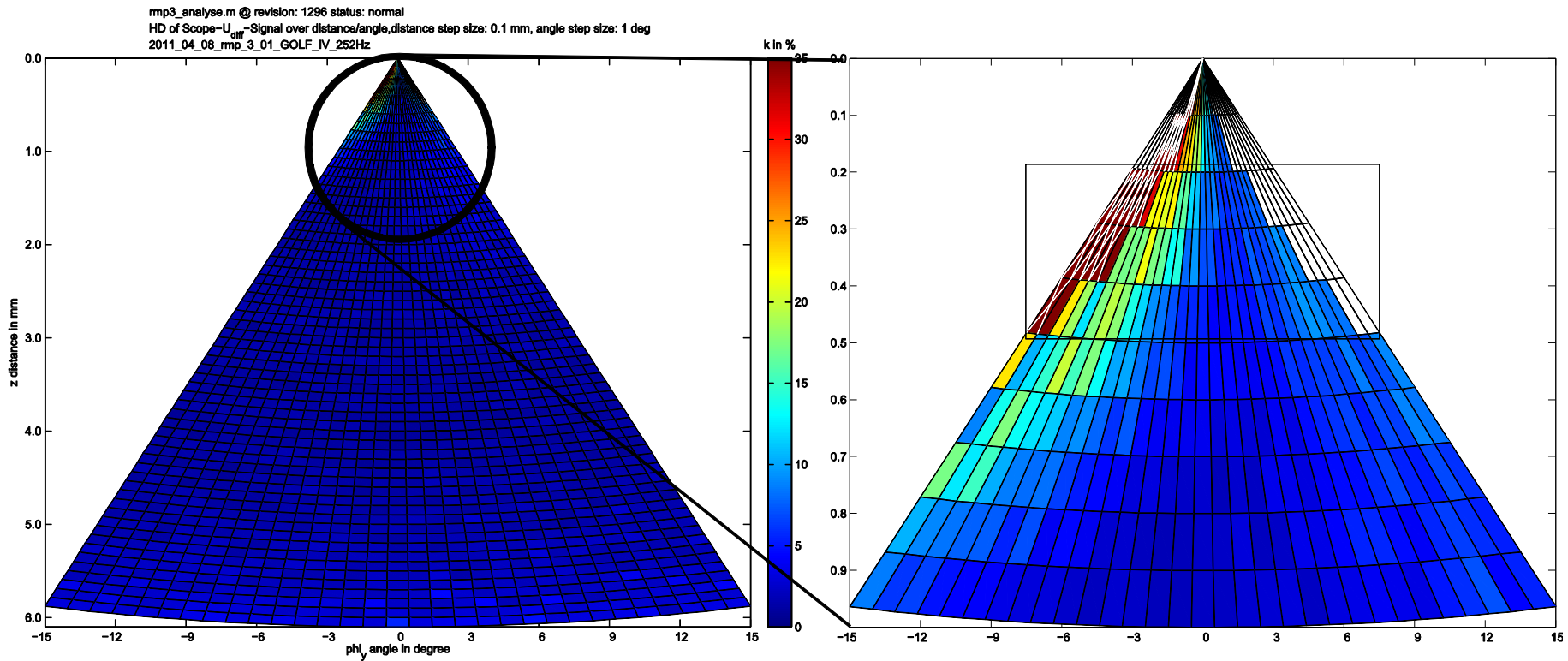


A 4: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des BMW 3er Encoders bei Verkippung um die Z-Achse nach [16]

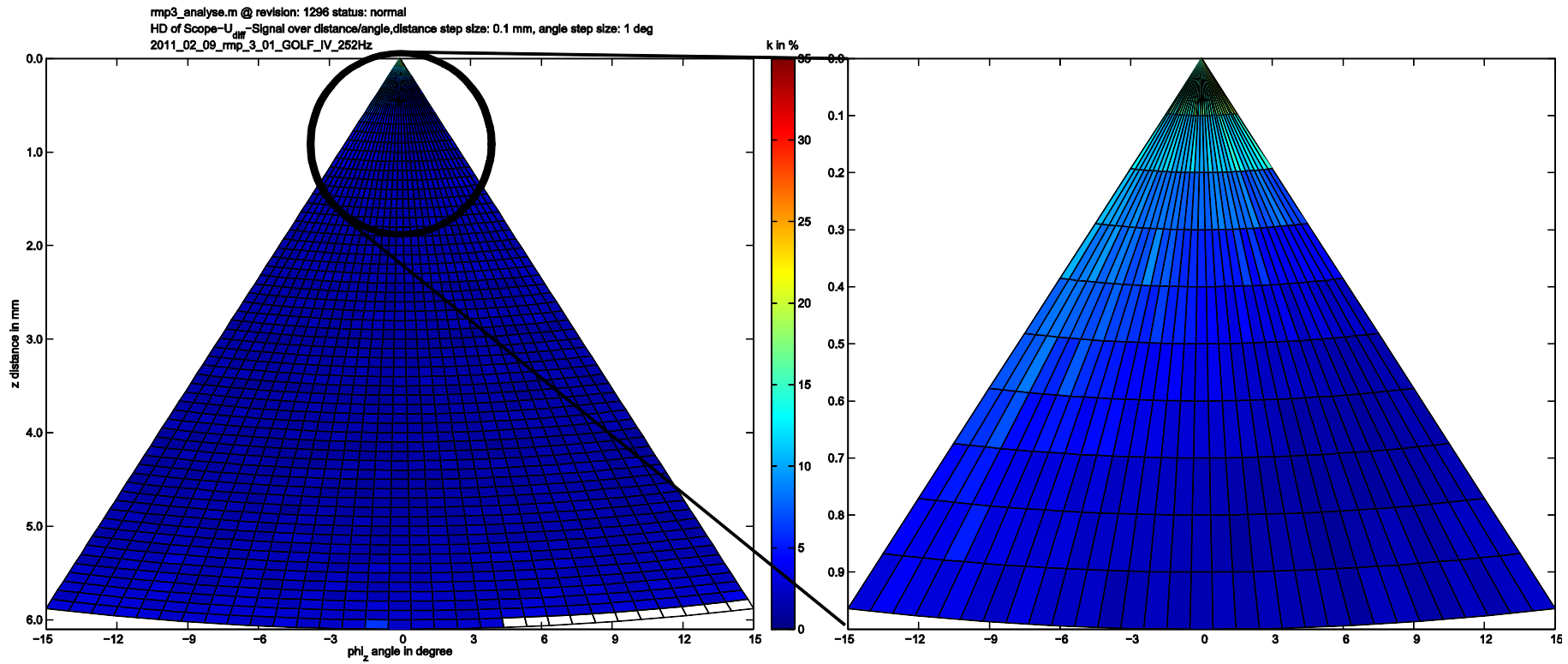


A 5: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 4 Encoders bei Verkippung um die X-Achse nach [16]

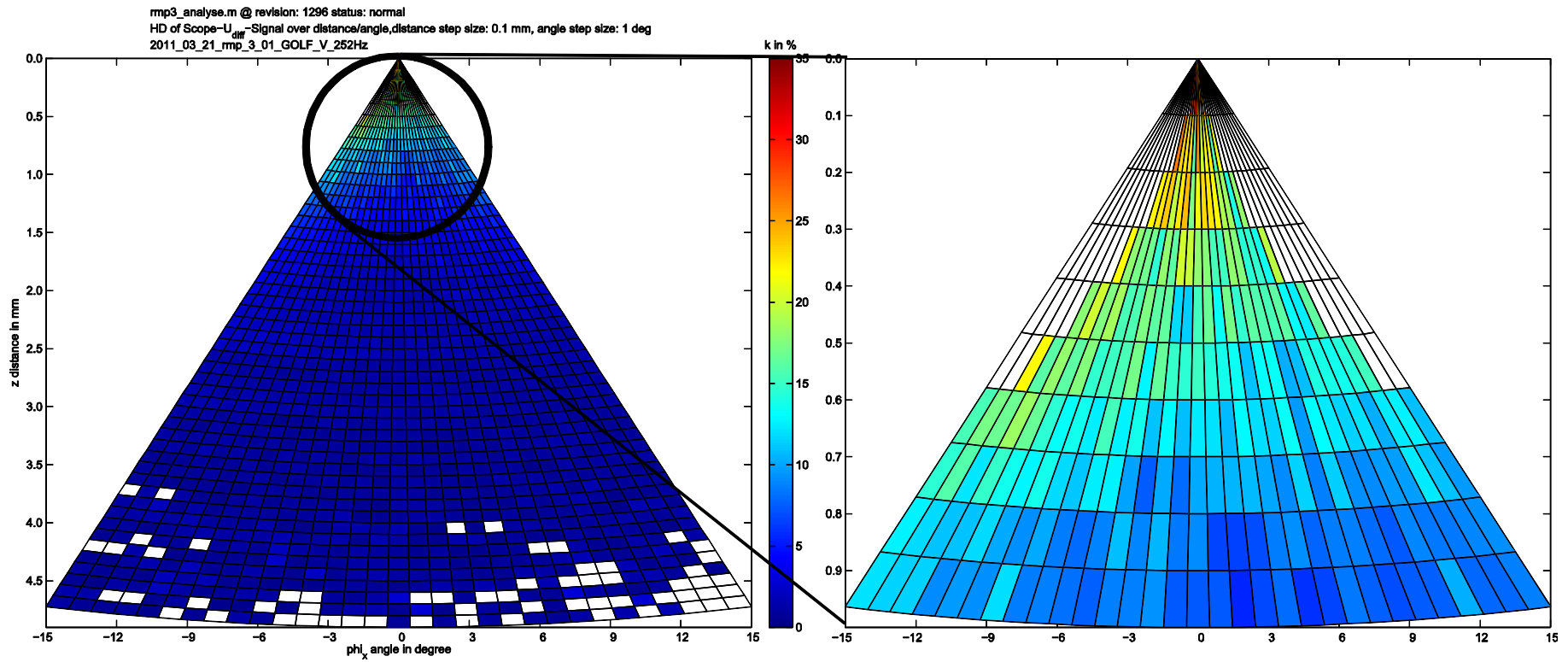




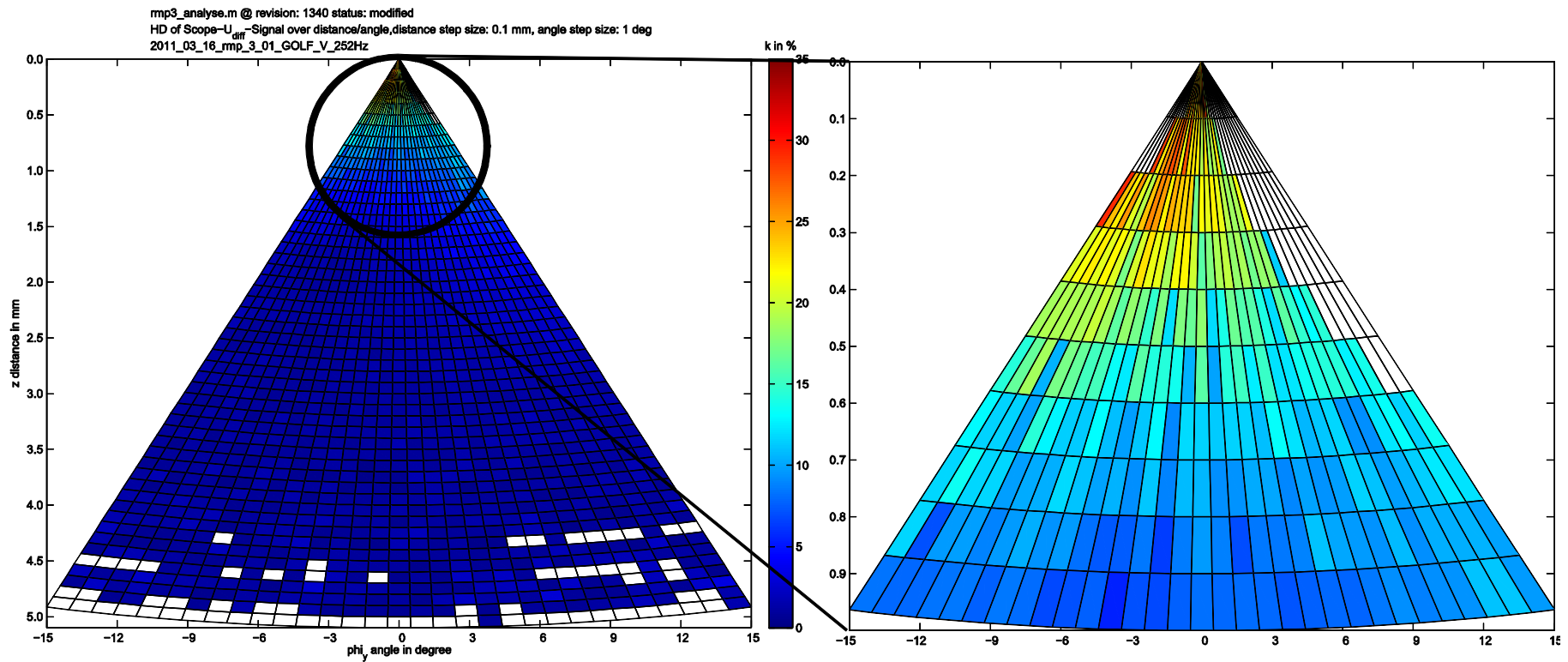
A 6: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 4 Encoders bei Verkippung um die Y-Achse nach [16], Markierung in rechter Pyramide kennzeichnet den Bereich der Synthese



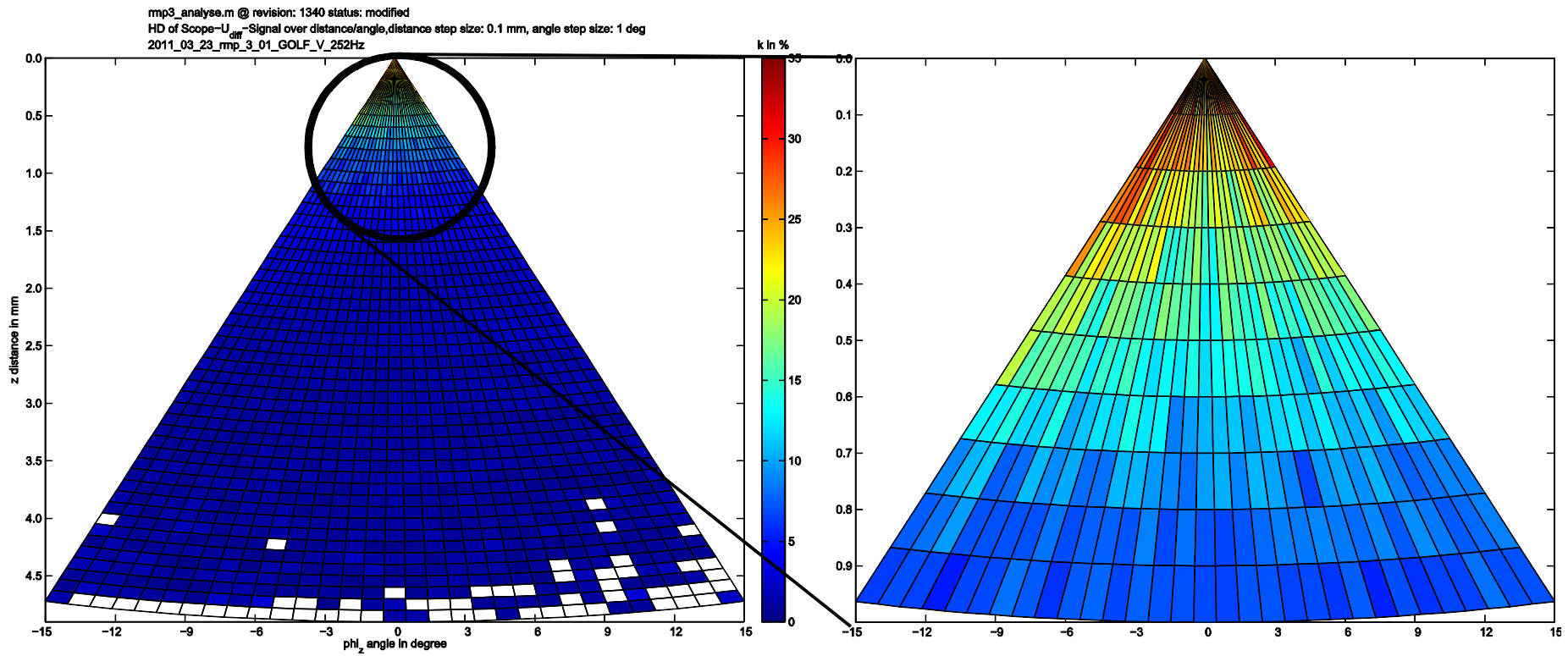
A 7: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 4 Encoders bei Verkippung um die Z-Achse nach [16]



A 8: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 5 Encoders bei Verkippung um die X-Achse nach [16]

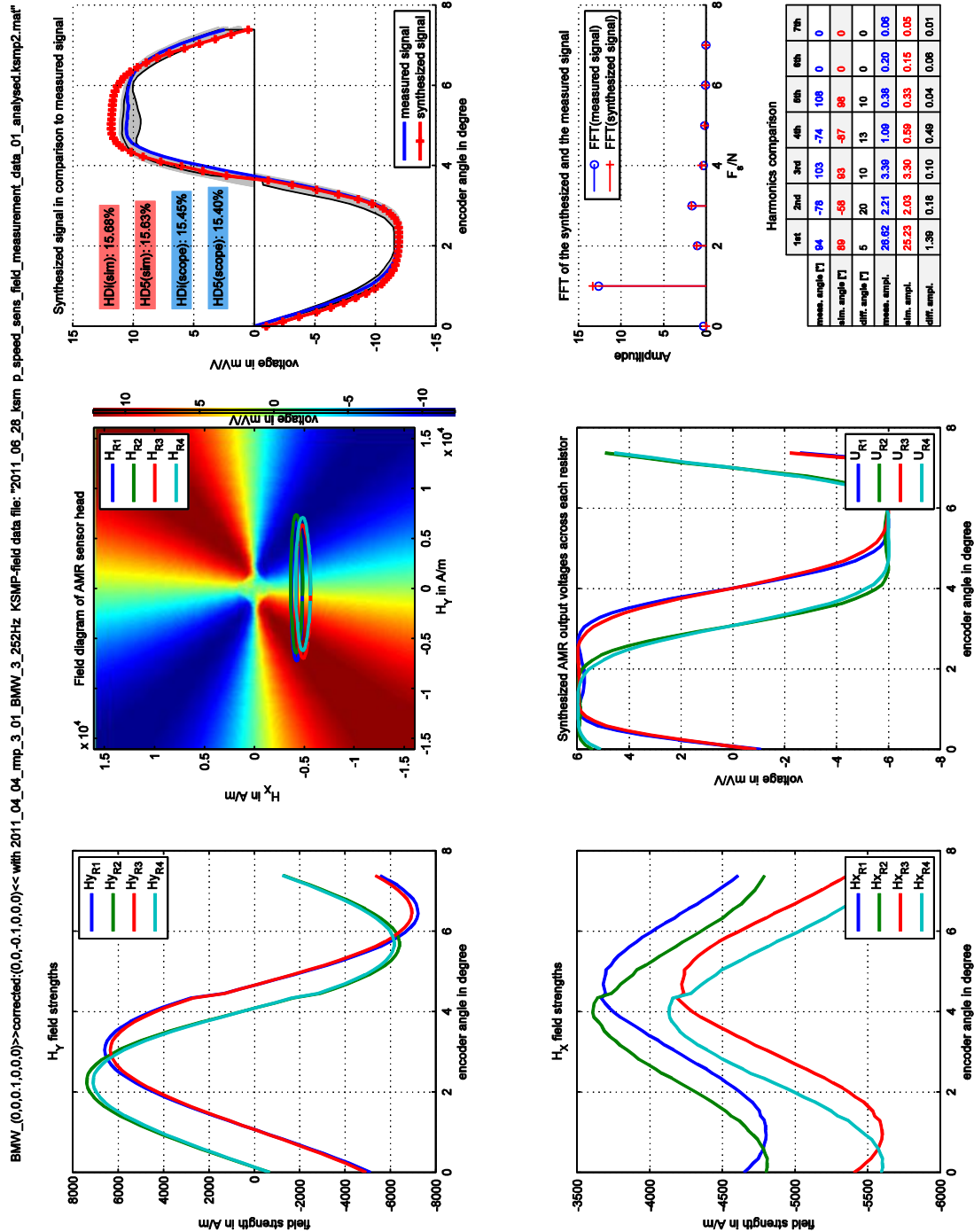


A 9: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 5 Encoders bei Verkippung um die Y-Achse nach [16]



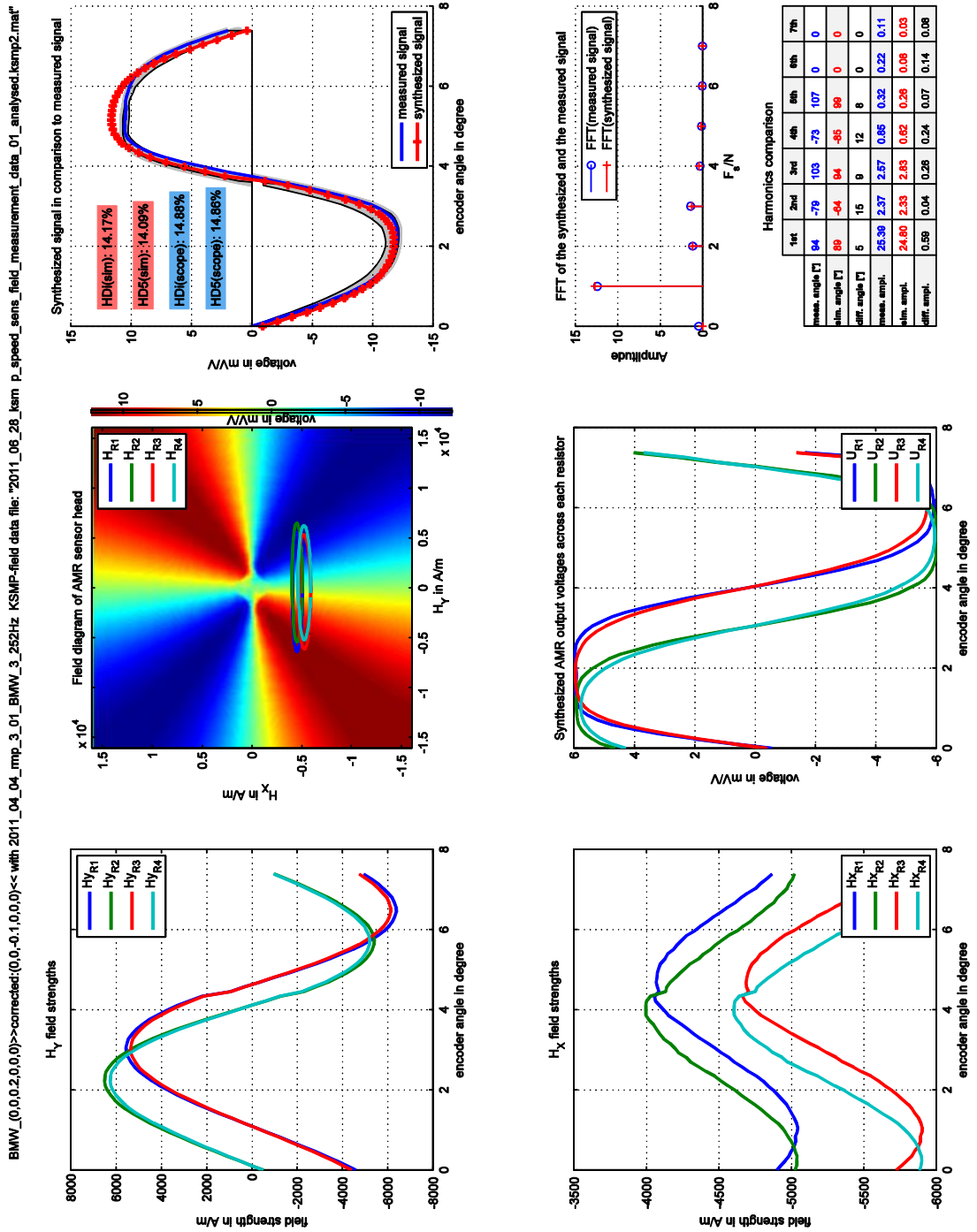
A 10: Messergebnisse der Radmessplatzmessung des Golf 5 Encoders bei Verkippung um die Z-Achse nach [16]

## Auszug aus den Syntheseergebnissen des BMW 3er Encoderrades



A 11: Syntheseergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0mm

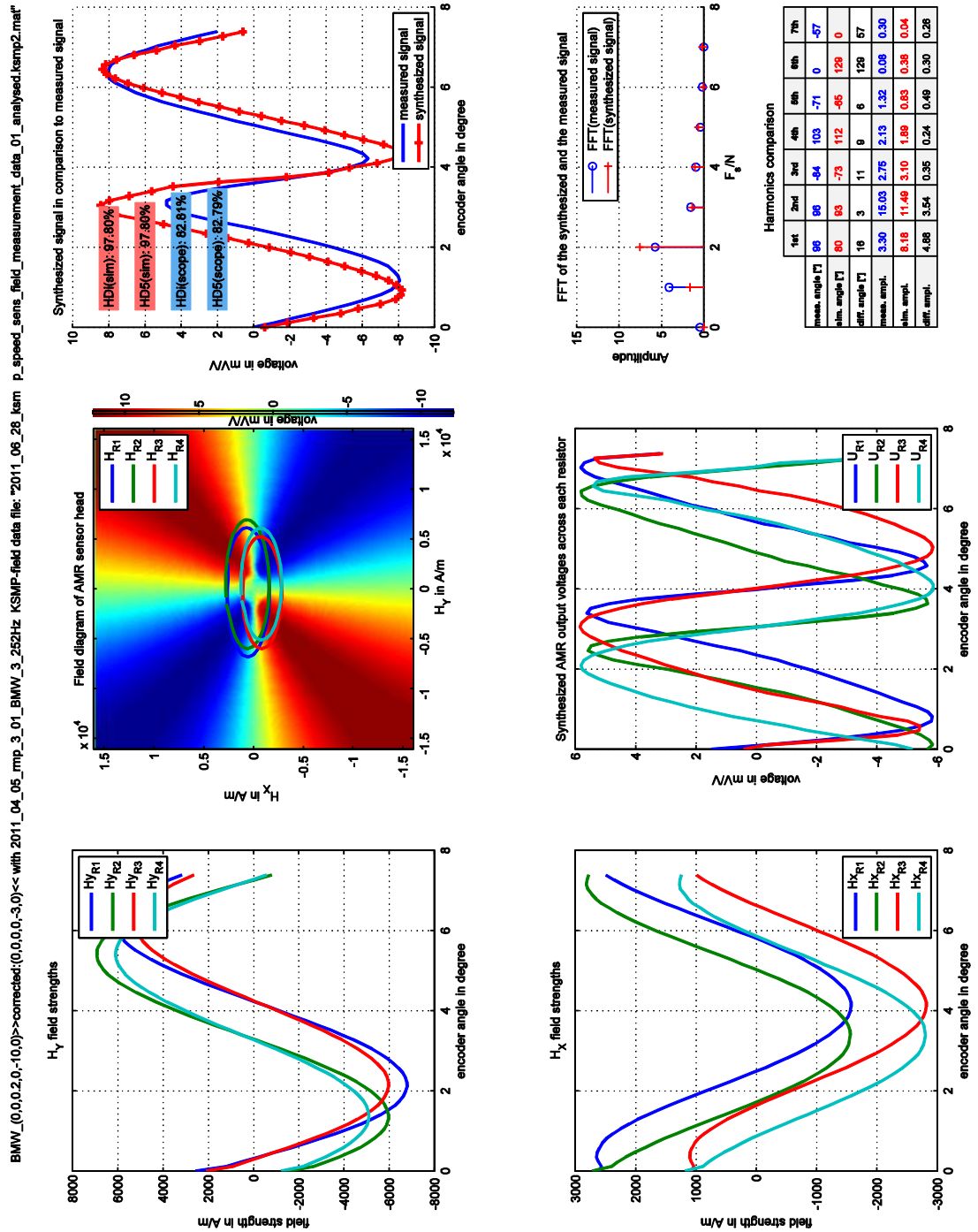
Bild A 11 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0mm. Die für einen sehr dichten Abstand typische Verzerrung ist hier zwar nicht sehr stark ausgeprägt, aber dennoch sichtbar. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Synthese ist sehr gut.



A 12: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.1mm

Bild A 12 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,1mm. Die Feldstärken  $H_Y$  sind schwächer in der Amplitude, wodurch die Verzerrung geringer ist als im Beispiel zuvor. Die Übereinstimmung zwischen Synthese und Messung ist auch hier sehr gut.

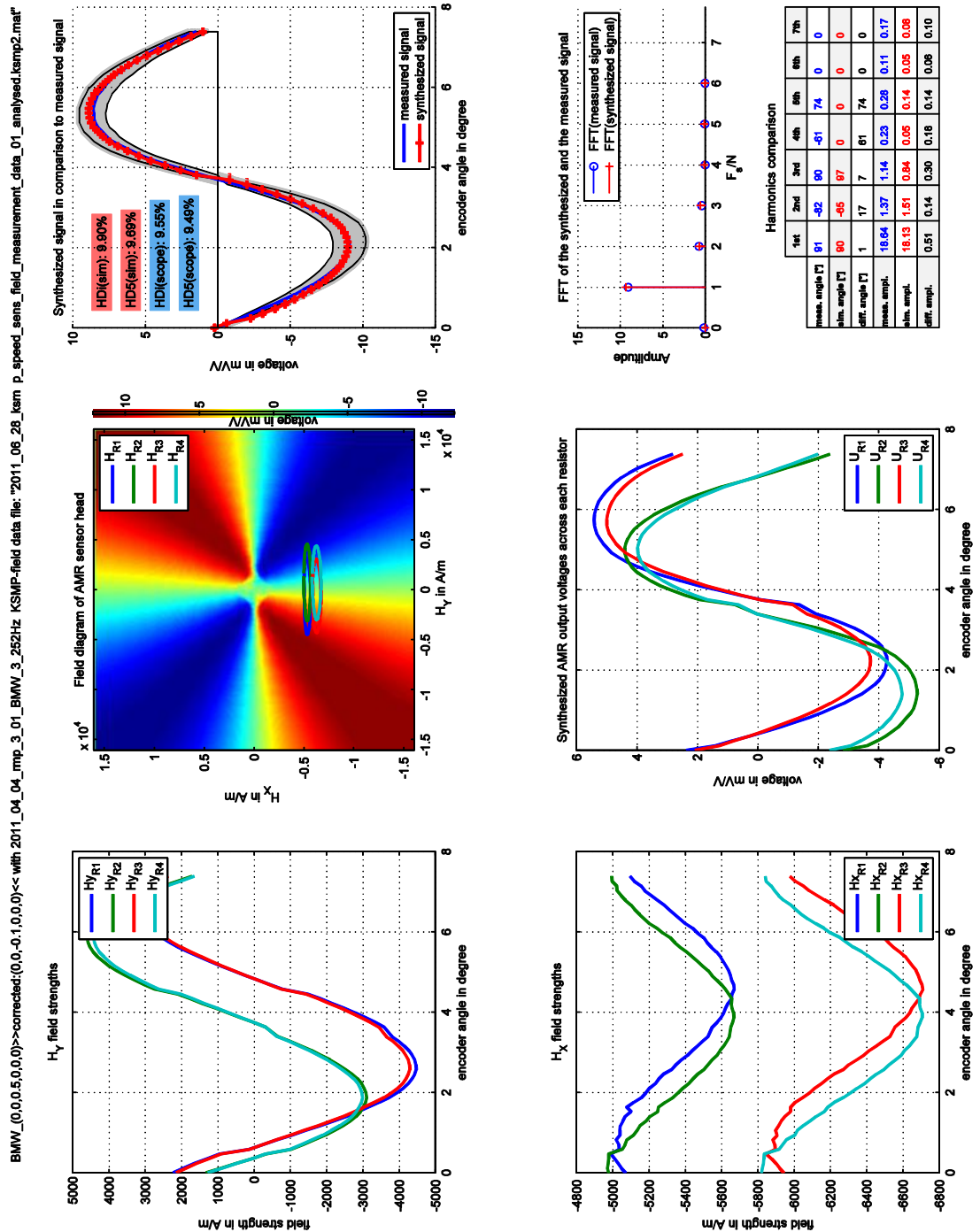




A 13: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von  $-10^\circ$  um die Y-Achse

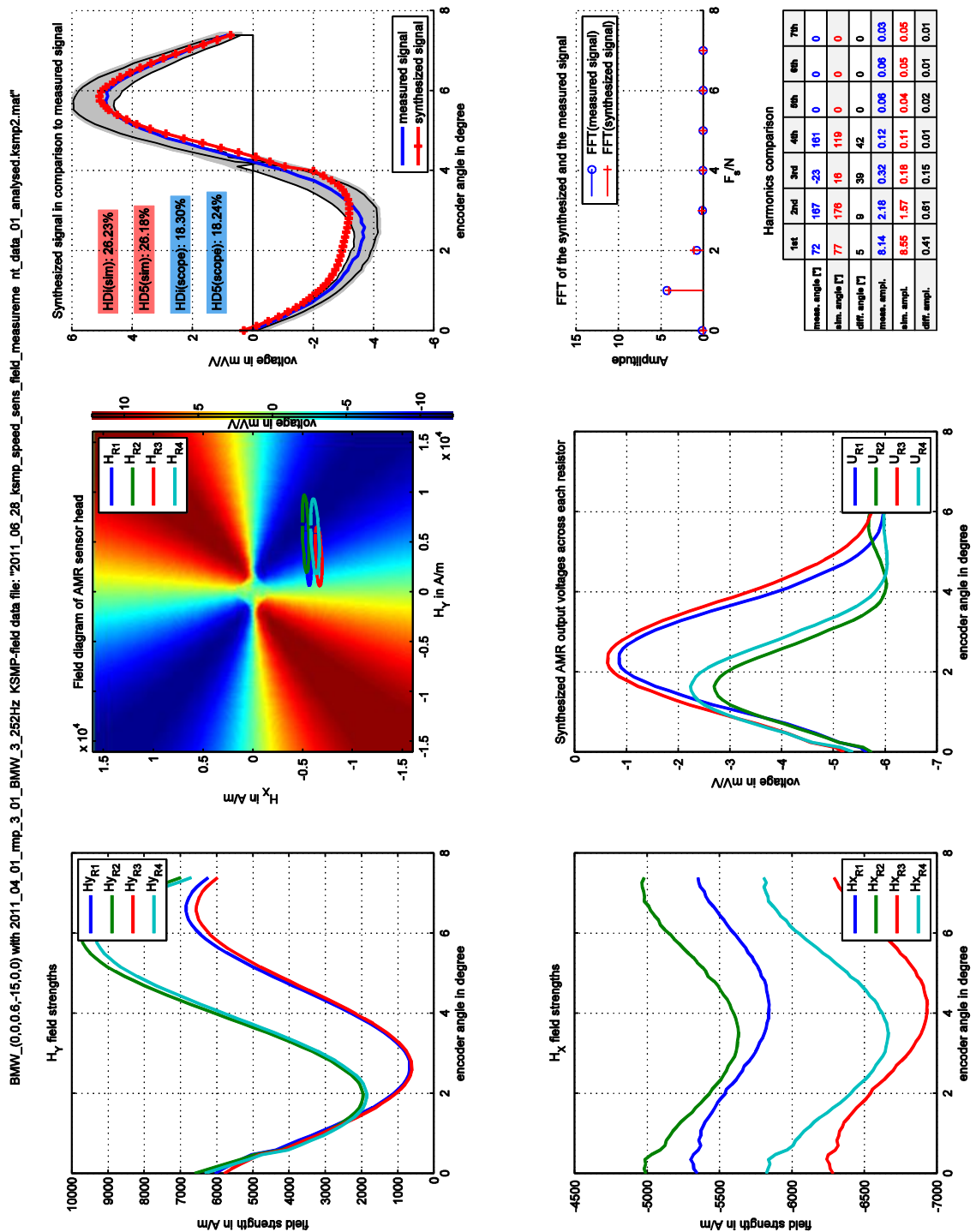
Bild A 13 zeigt das Ergebnis bei einem Abstand von 0,2mm und dem Winkel  $\varphi_Y = -10^\circ$ . Der Abstand kann nicht korrigiert werden, da für diesen kein Messergebnis vorliegt. Dennoch ist eine Übereinstimmung bezüglich des Frequenzverhaltens zu erkennen. Der fehlerhafte Abstand hat die Abweichung in der Amplitude zur Folge. Aus diesem Grund weichen folglich auch die HDs voneinander ab.





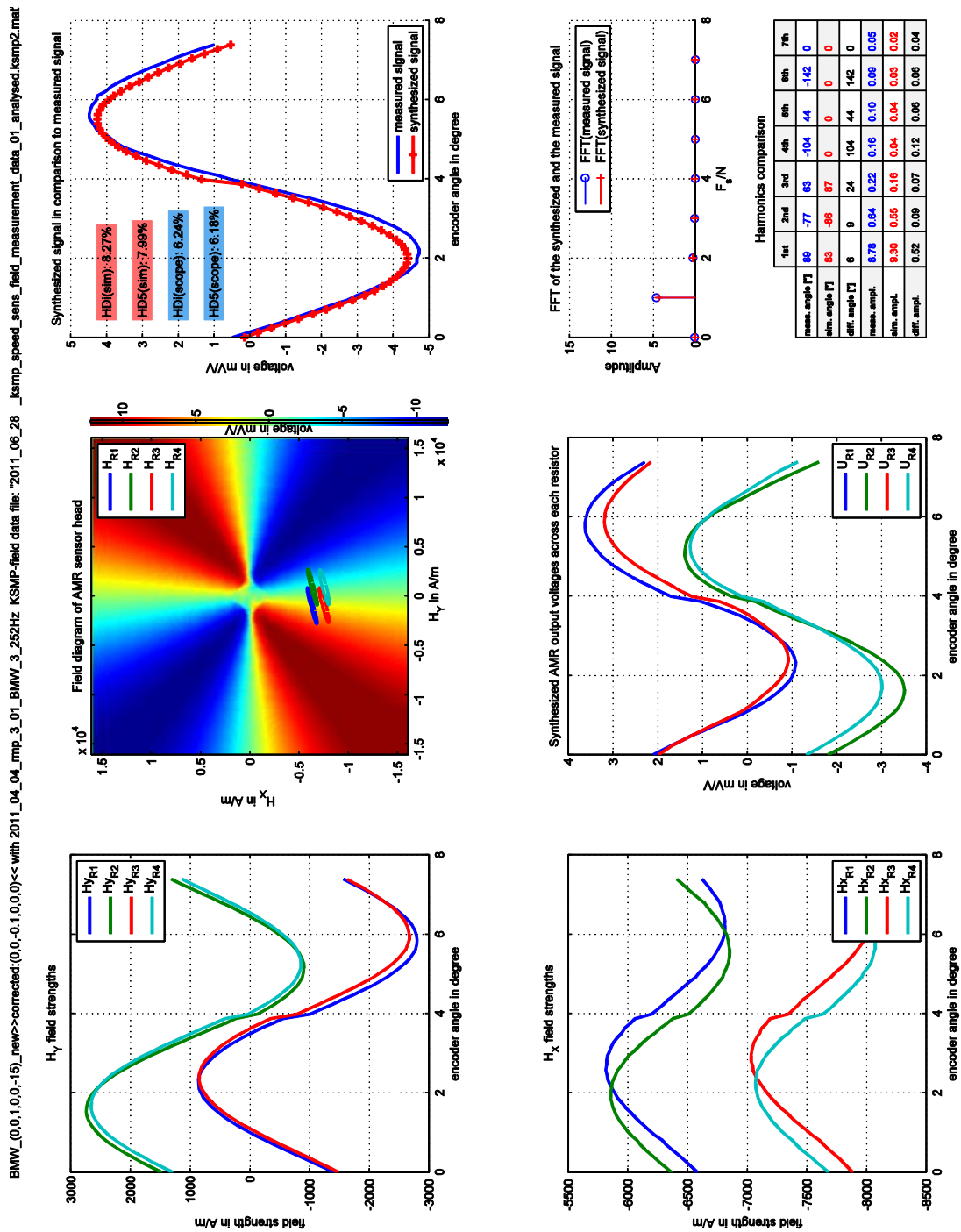
A 14: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.4mm

Bild A 14 zeigt das Ergebnis der Synthese bei einem Abstand von 0,4mm. Eine Verzerrung des Signals ist nicht mehr erkennbar. Auch ohne die Korrektur des Winkels um  $-3^\circ$  liegt das Ergebnis schon in der Mitte der Messergebnisse, was durch den grauen Bereich deutlich wird. Aus diesem Grund stimmen auch die HDs sehr gut überein.



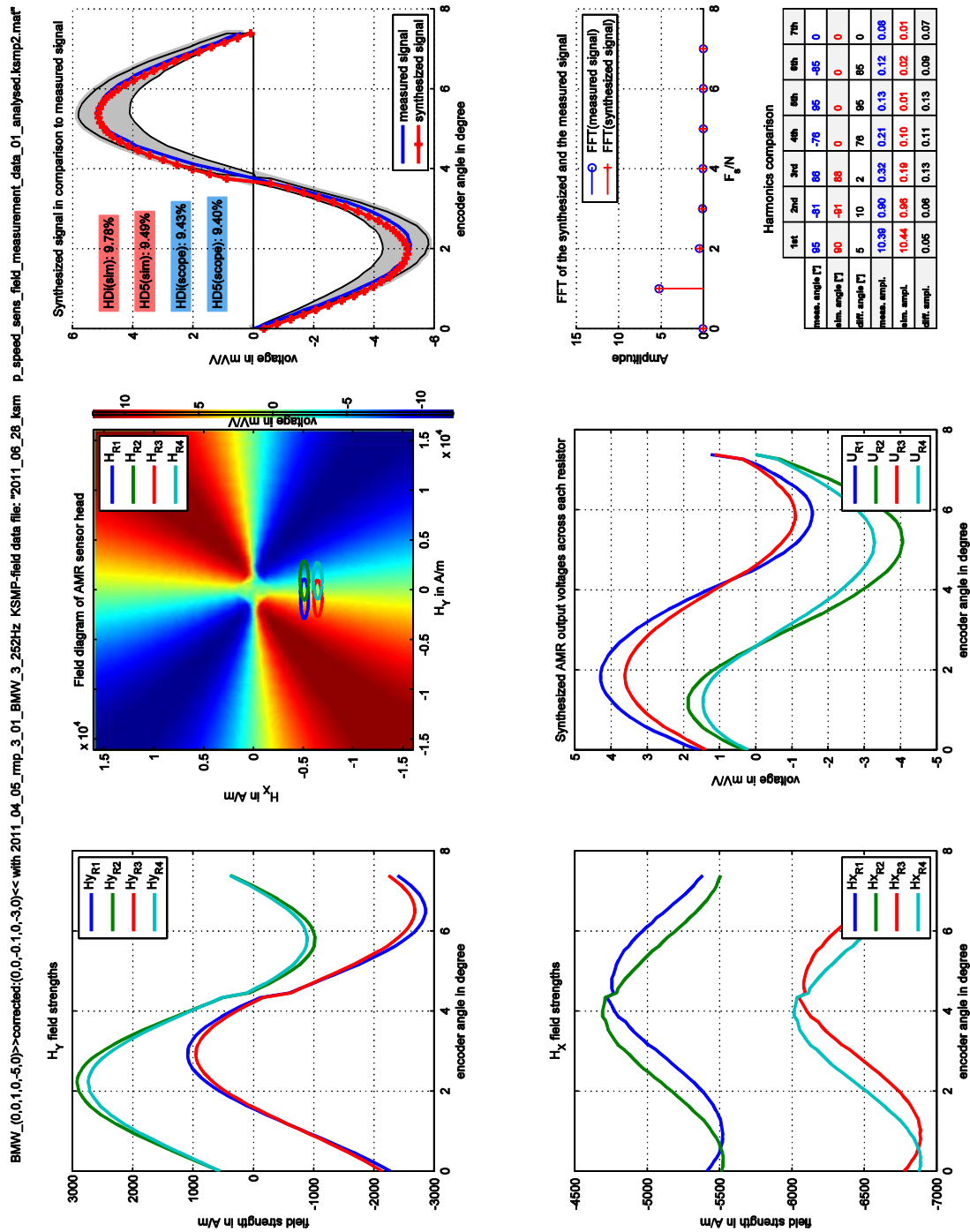
A 15: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von  $-15^\circ$  um die X-Achse

Bild A 15 zeigt das Ergebnis bei einem Abstand von 0,6mm und einer Verkippung von  $\varphi_X = -15^\circ$ . Die typische Verschiebung der Ellipsen in dem Kennfeld wird sichtbar. Auf Grund nicht vorhandener Messergebnisse konnte keine Abstands- und Winkelkorrektur durchgeführt werden. Dennoch zeigt sich eine gute Übereinstimmung, die aber nach Verbesserung des Modells einerseits und der Messung andererseits noch verbessert werden kann.



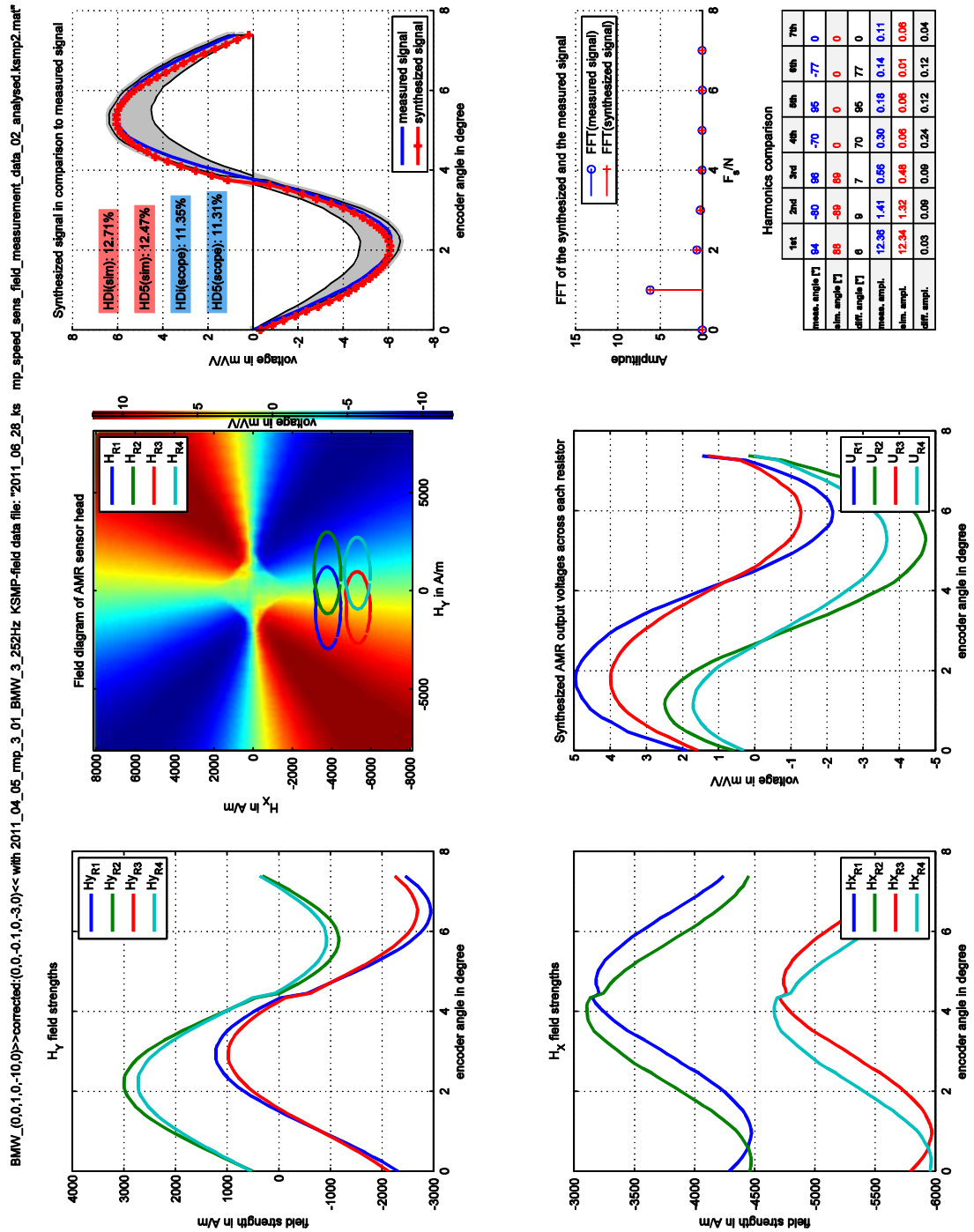
A 16: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von  $-15^\circ$  um die Z-Achse

Bild A 16 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_z = -15^\circ$ . Die Ellipsen im Kennfeld sind auch hier deutlich gedreht. Allerdings zeigt sich eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber der Verkippung, da hier das Ausgangssignal einer Sinusform sehr nahe kommt. Auf Grund der unterschiedlichen Amplituden weichen die HDs geringfügig voneinander ab.



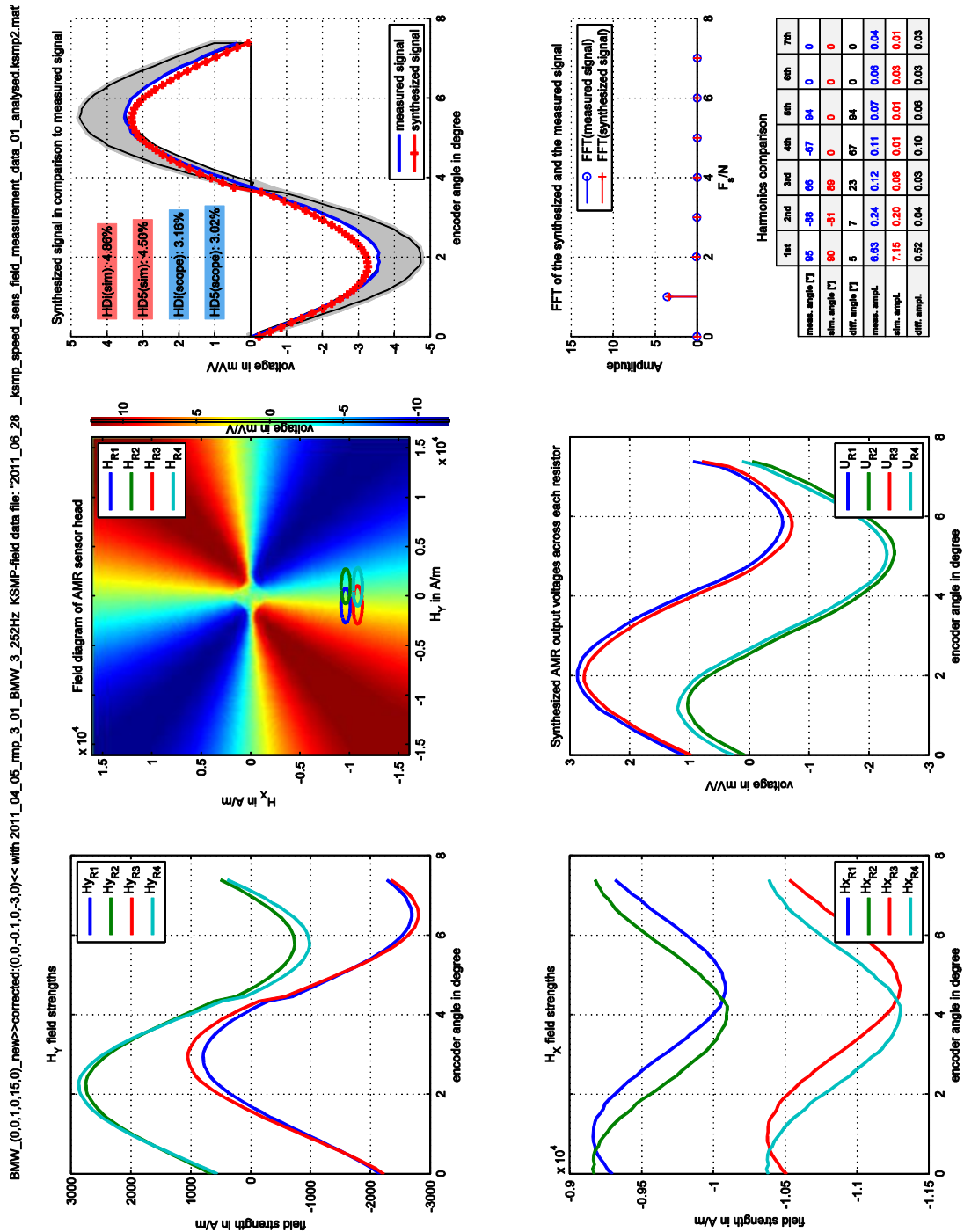
A 17: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von  $-5^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 17 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -5^\circ$ . Die Ellipsen verschieben sich leicht gegeneinander und öffnen sich geringfügig. Im Ergebnis zeigt sich, dass diese Verkippung noch keine deutliche Auswirkung auf das Ausgangssignal hat. Das Synthesergebnis liegt in der Mitte des Bereiches der Messergebnisse und weist somit eine sehr gute Übereinstimmung auf. Dies spiegelt sich auch in den HDs, die einen Unterschied von unter 1% aufzeigen, wieder.



A 18: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von  $-10^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 18 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -10^\circ$ . Die Ellipsen rücken näher zum Zentrum des Kennfeldes hin, da die Offsets von  $H_X$  positiver als im Beispiel zuvor sind.  $H_Y$  hingegen bekommt ein negativeres Offset, wodurch sich die Ellipsen weiter öffnen. Auch hier stimmt das Synthesergebnis sehr gut mit der Messung überein. Die HDs weisen einen Unterschied von circa 1% auf.

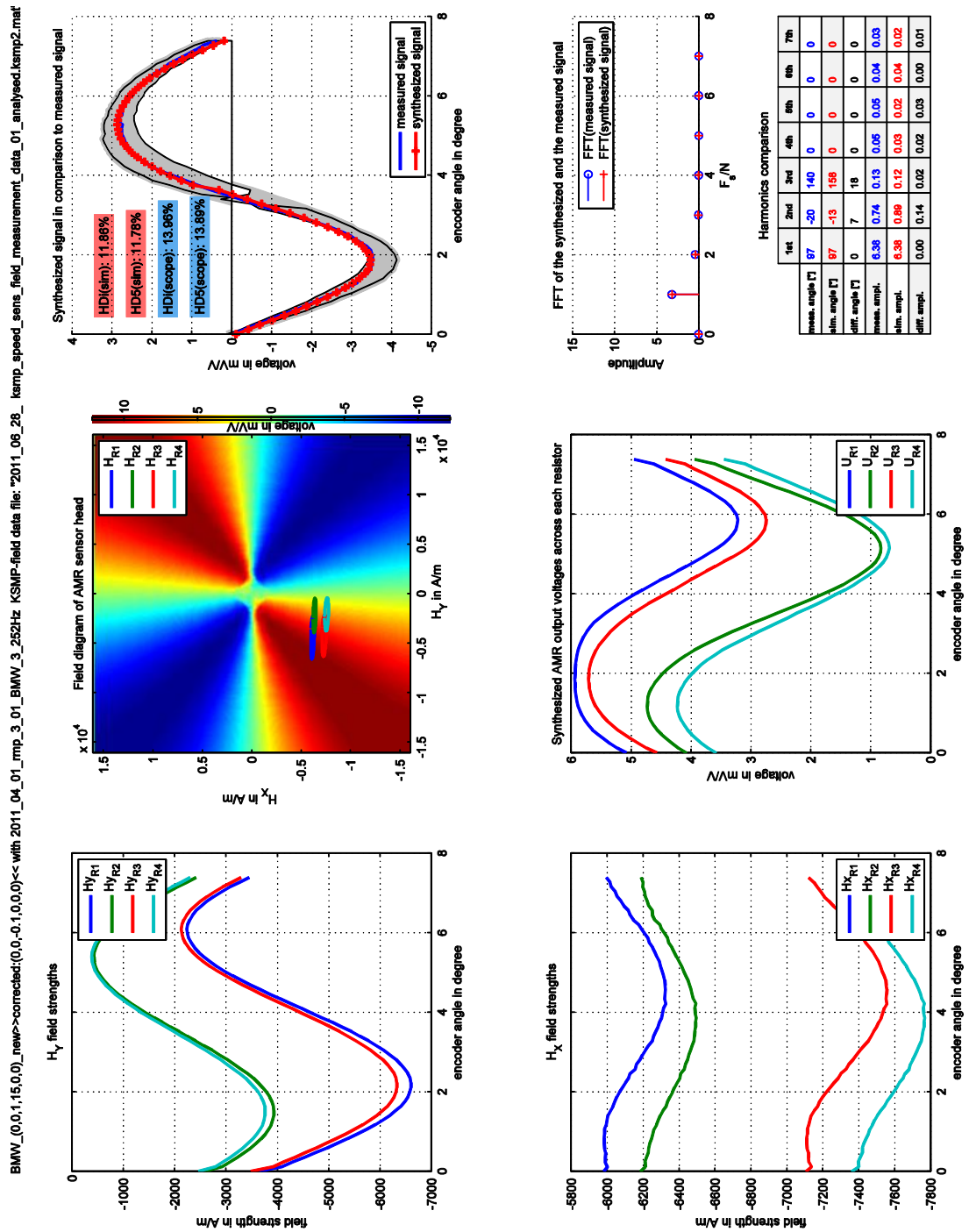


A 19: Syntheseresultat BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von 15° um die Y-Achse

Bild A 19 zeigt das Syntheseresultat bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = 15^\circ$ .  $H_X$  besitzt ein stärkeres negatives Offset als bei einer negativen Verkippung, wodurch die Ellipsen vom Zentrum wegrücken.  $H_Y$  hat sich weder im Offset noch in der Amplitude auffallend verändert. Wird der Feldstärkebereich des Kennfeldes miteinbezogen, zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Beispiel zuvor, in dem die Ellipsen geöffnet sind. Syntheseresultat und Messung



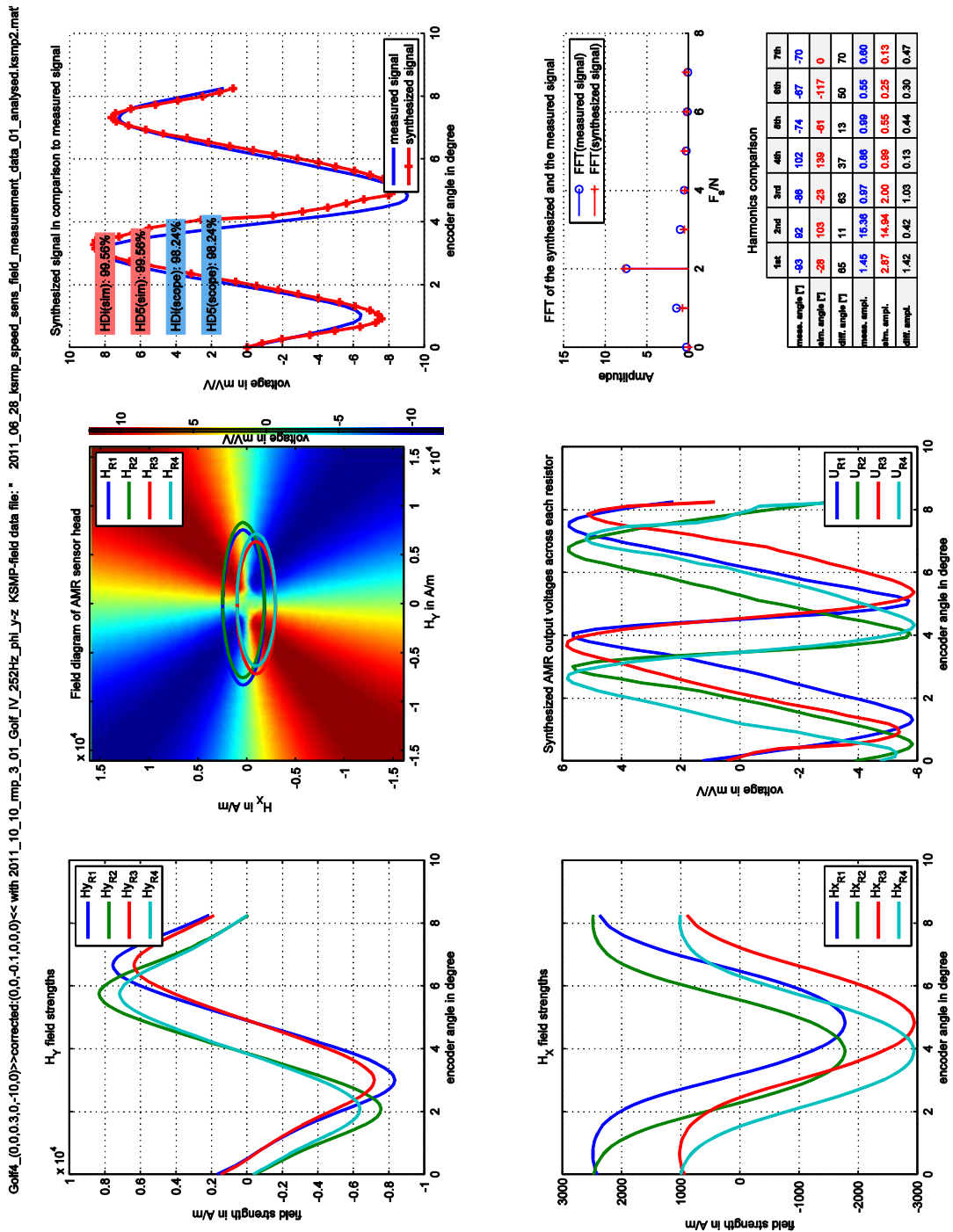
stimmen bis auf die Amplitude auch hier noch gut überein. Die HDs weichen um circa 1,5% voneinander ab.



A 20: Synthesergebnis BMW 3er Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von 15° um die X-Achse

Bild A 20 zeigt das Synthesergebnis bei einer Entfernung von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_X = 15^\circ$ .  $H_X$  und  $H_Y$  verfügen über die typische Phasenverschiebung. Das Ergebnis liegt in der Mitte der Messergebnisse. Lediglich die HDs weichen um circa 2% voneinander ab.

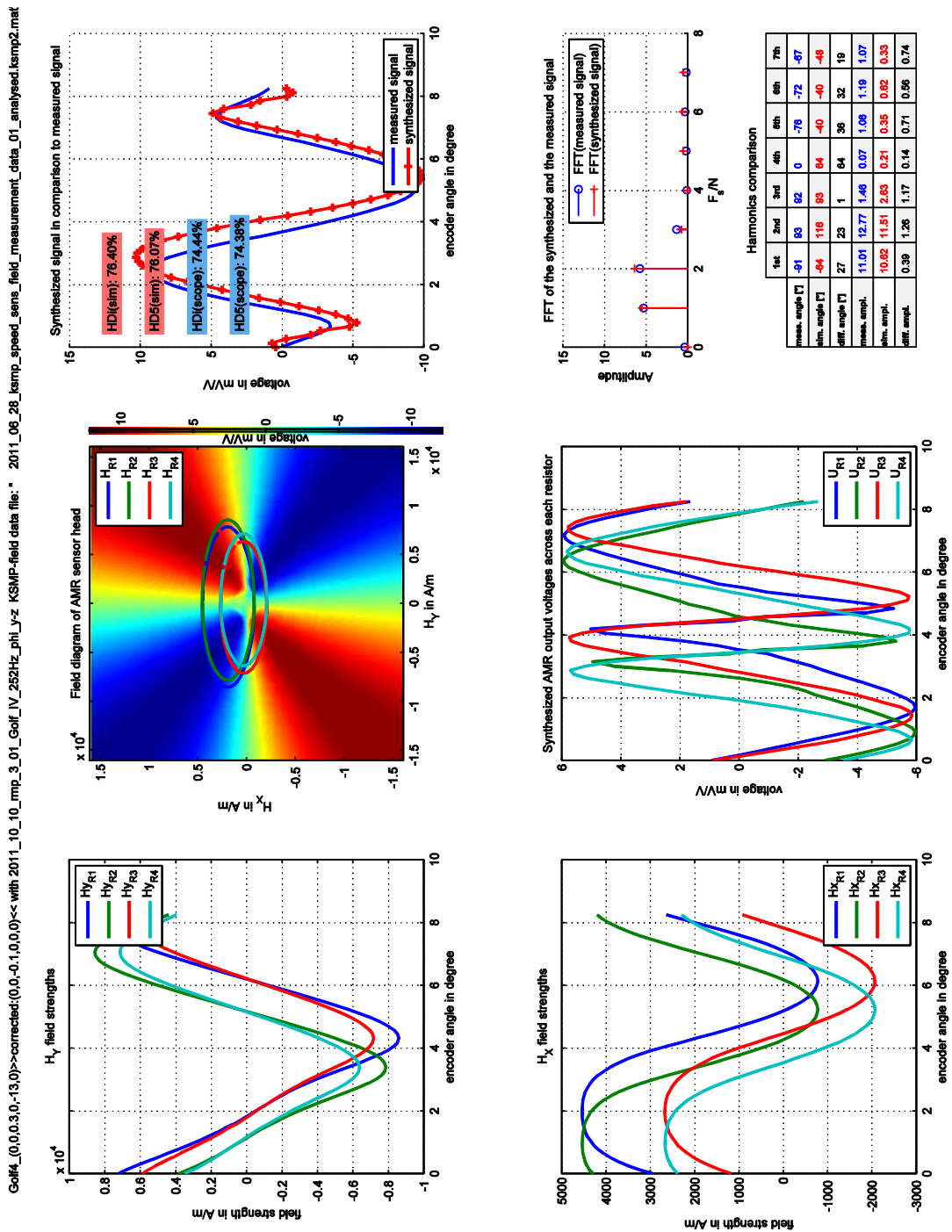
## Auszug aus den Synthesergebnissen des Golf 4 Encoderrades



A 21: Synthesergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von  $-10^\circ$  um die Y-Achse

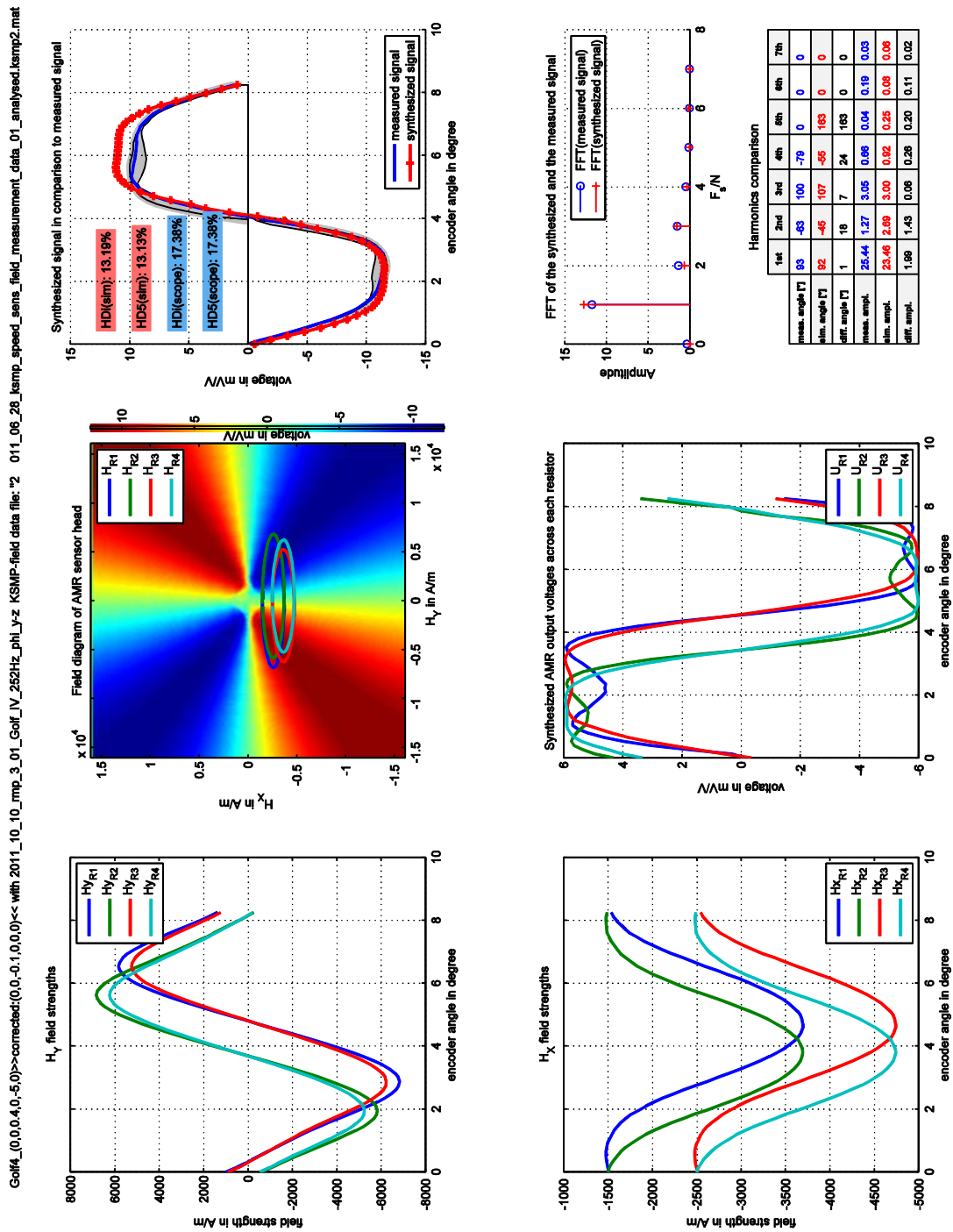
Bild A 21 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,2mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -10^\circ$ . Hier liegen neue Messergebnisse vor, bei dem der Sensor nicht verkippt ist. Aus diesem Grund ist eine Korrektur nicht notwendig. Die Ellipsen liegen um den Mittelpunkt des Kennfeldes. Daraus resultiert die deutlich zu erkennende Frequenzverdopplung. Synthese und Messung stimmen sehr gut miteinander überein.





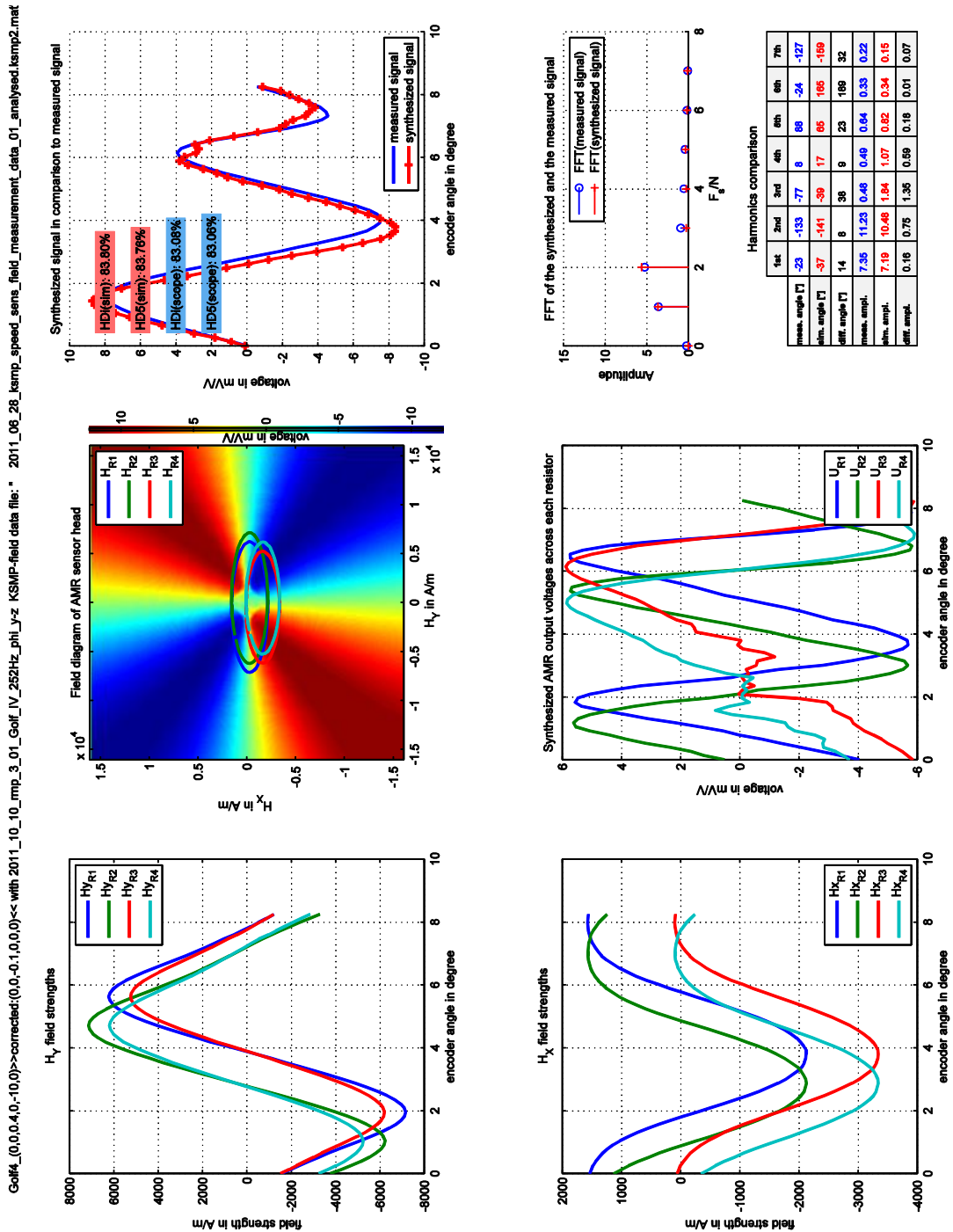
A 22: Syntheseresult Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von  $-13^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 22 zeigt das Syntheseresult bei einem Abstand von 0,2mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -13^\circ$ . Auch hier kommen die neuen Messergebnisse zur Anwendung. Durch die stärkere Verkippung hat  $H_X$  ein stärkeres positives Offset, wodurch die Ellipsen höher im Kennfeld liegen. Da zwei von diesen die Mitte kreuzen, ergeben sich hier Abweichungen (vgl. Kapitel 3.4). Dennoch zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem Syntheseresult und der Messung. Die HDs weichen um circa 2% voneinander ab.



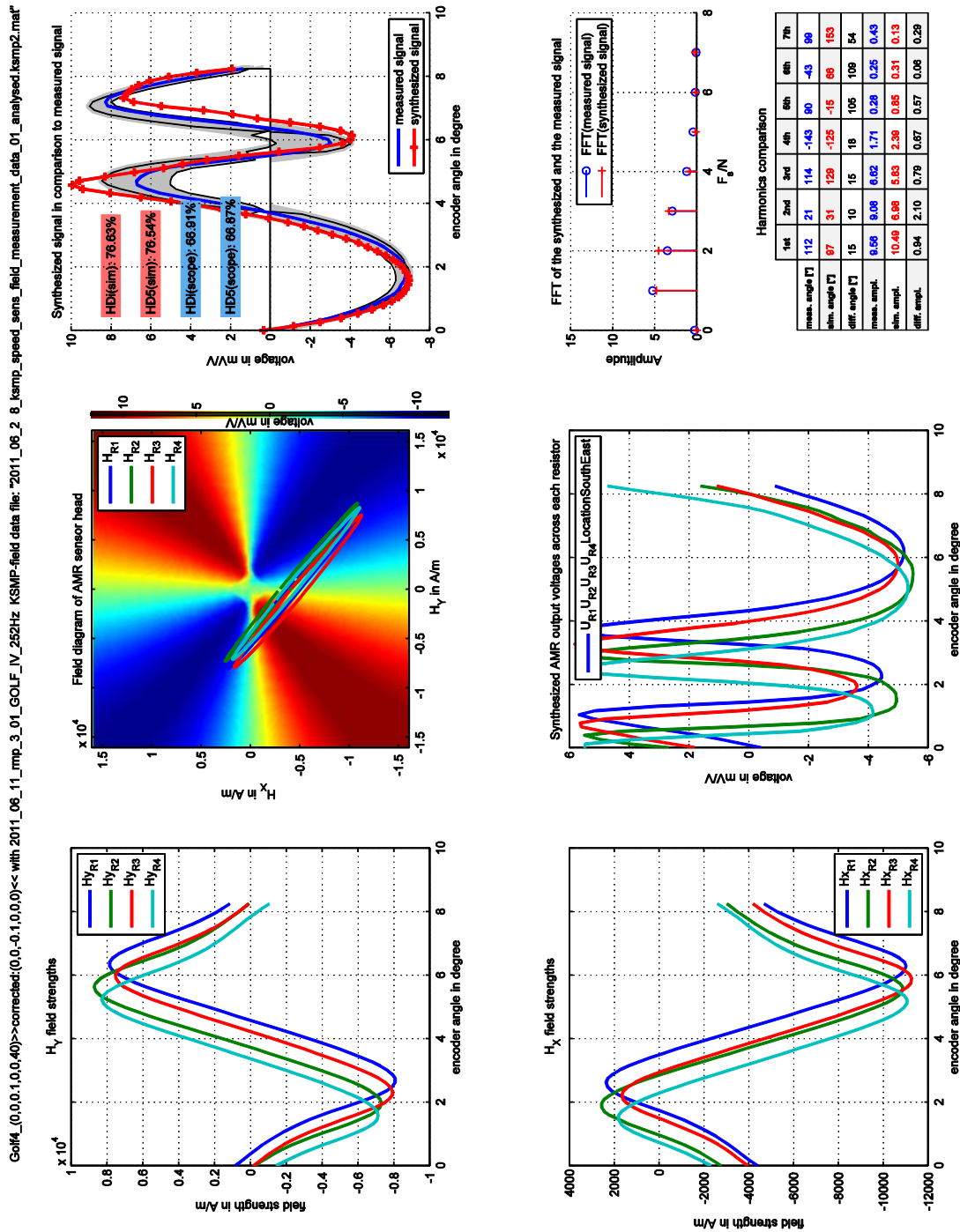
A 23: Syntheseeergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von  $-5^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 23 zeigt das Syntheseeergebnis bei einem Abstand von 0,3mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -5^\circ$ . Der Offset von  $H_X$  ist sehr schwach ausgeprägt. Dadurch rücken die Ellipsen in die Nähe des Zentrums des Kennfeldes und es zeigt sich eine Verzerrung des Ausgangssignals. Die HDs weisen hier eine deutliche Abweichung von circa 4% auf.



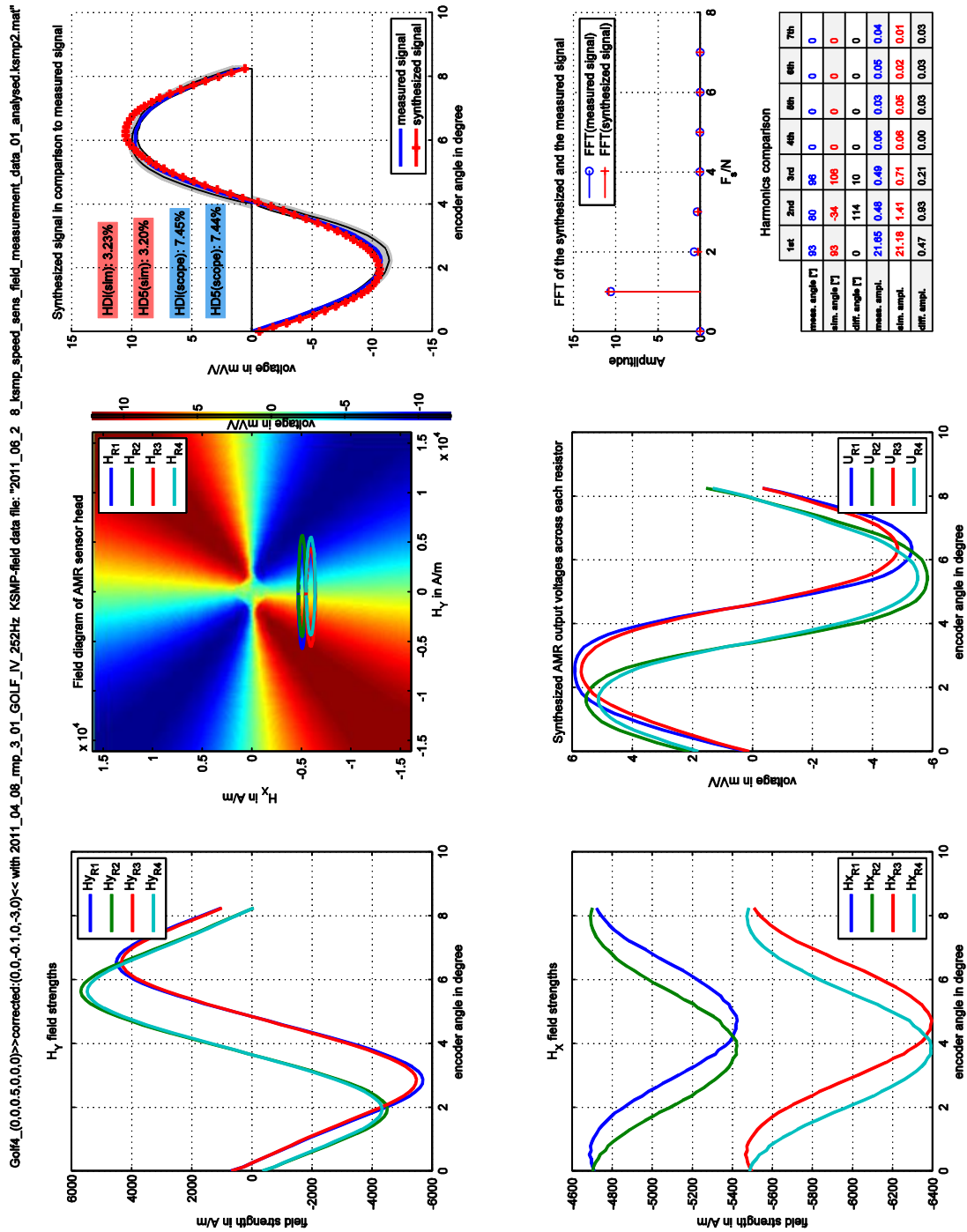
A 24: Syntheseresult Golf 4 Encoder bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von  $-10^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 24 zeigt das Syntheseresult bei einem Abstand von 0,3mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -10^\circ$ . Eine zusätzliche Verkippung von  $-5^\circ$  im Vergleich zu Bild A 23 bewirkt ein weiteres Ansteigen des Offsets von  $H_X$ . Dadurch liegen die Ellipsen nun wieder um den Mittelpunkt des Kennfeldes, wodurch sich die Frequenzverdopplung ergibt.



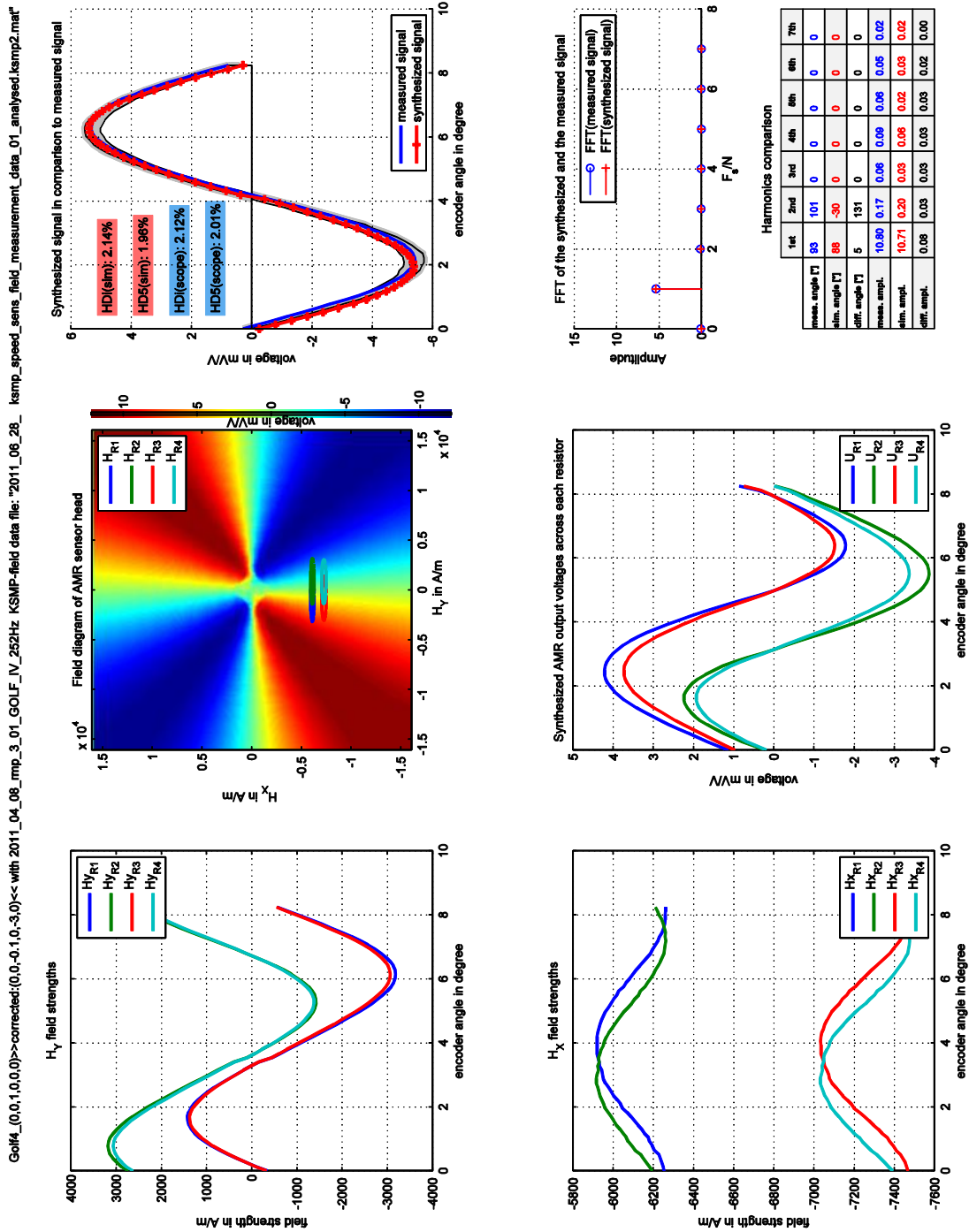
A 25: Synthesergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0mm und einer Verkippung von  $40^\circ$  um die Z-Achse

Bild A 25 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0mm und einer Verkippung von  $\varphi_Z = 40^\circ$ . Der in Bild 7.4 gezeigte Effekt hat sich verstärkt. Zudem sind  $H_x$  und  $H_y$  um circa  $180^\circ$  zueinander phasenverschoben. Das Synthesergebnis besitzt eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Lediglich die Amplitude zeigt eine eindeutige Abweichung. Aus diesem Grund unterscheiden sich die HDs um circa 10% voneinander.



A 26: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm

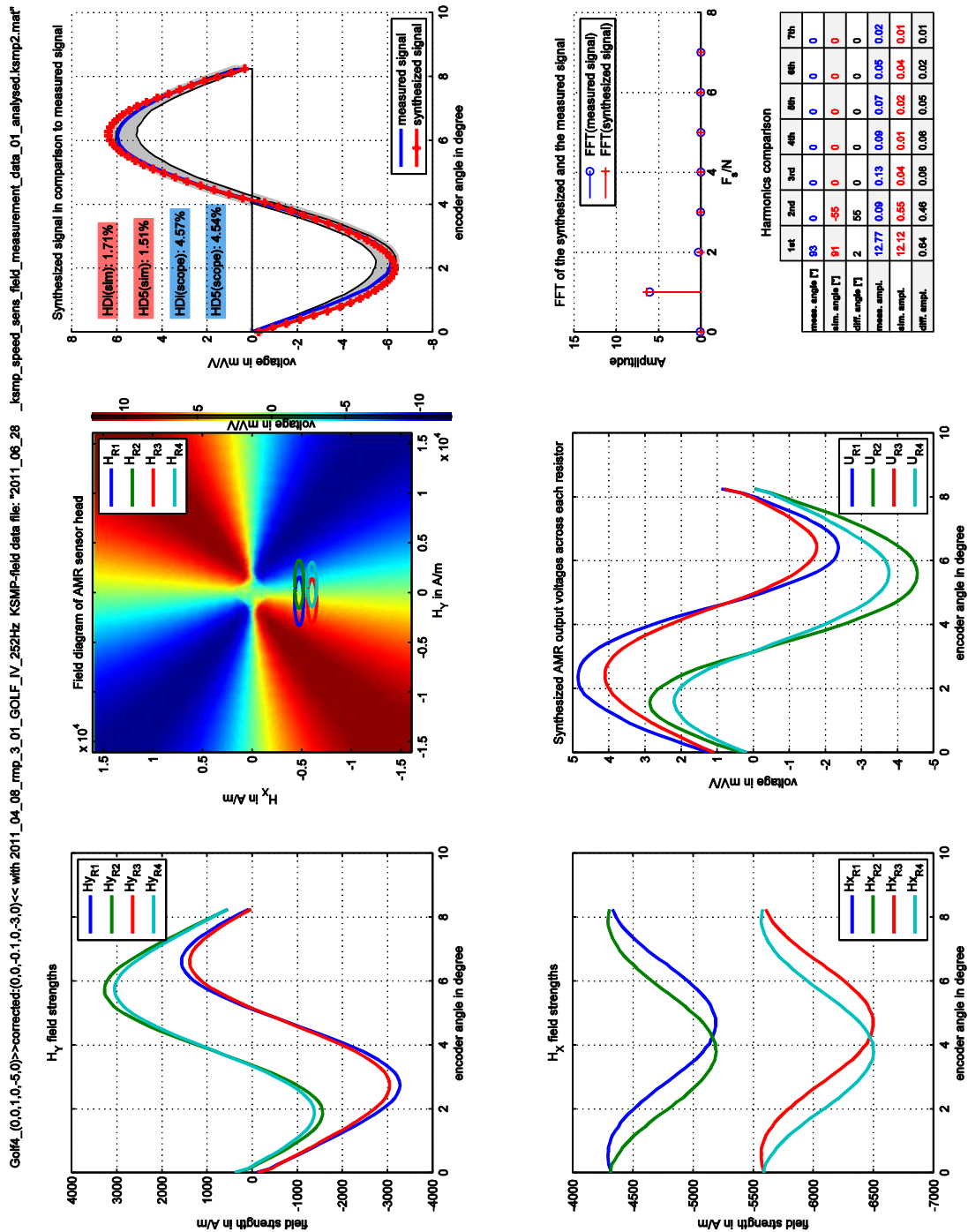
Bild A 26 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,3mm. Dieses Ergebnis weist eine deutlich leichtere Verzerrung als das Messergebnis auf. Dies ist optisch nicht sehr gut zu erkennen, wird aber bei der Betrachtung der HDs deutlich. Diese weichen um circa 4% voneinander ab.



A 27: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm

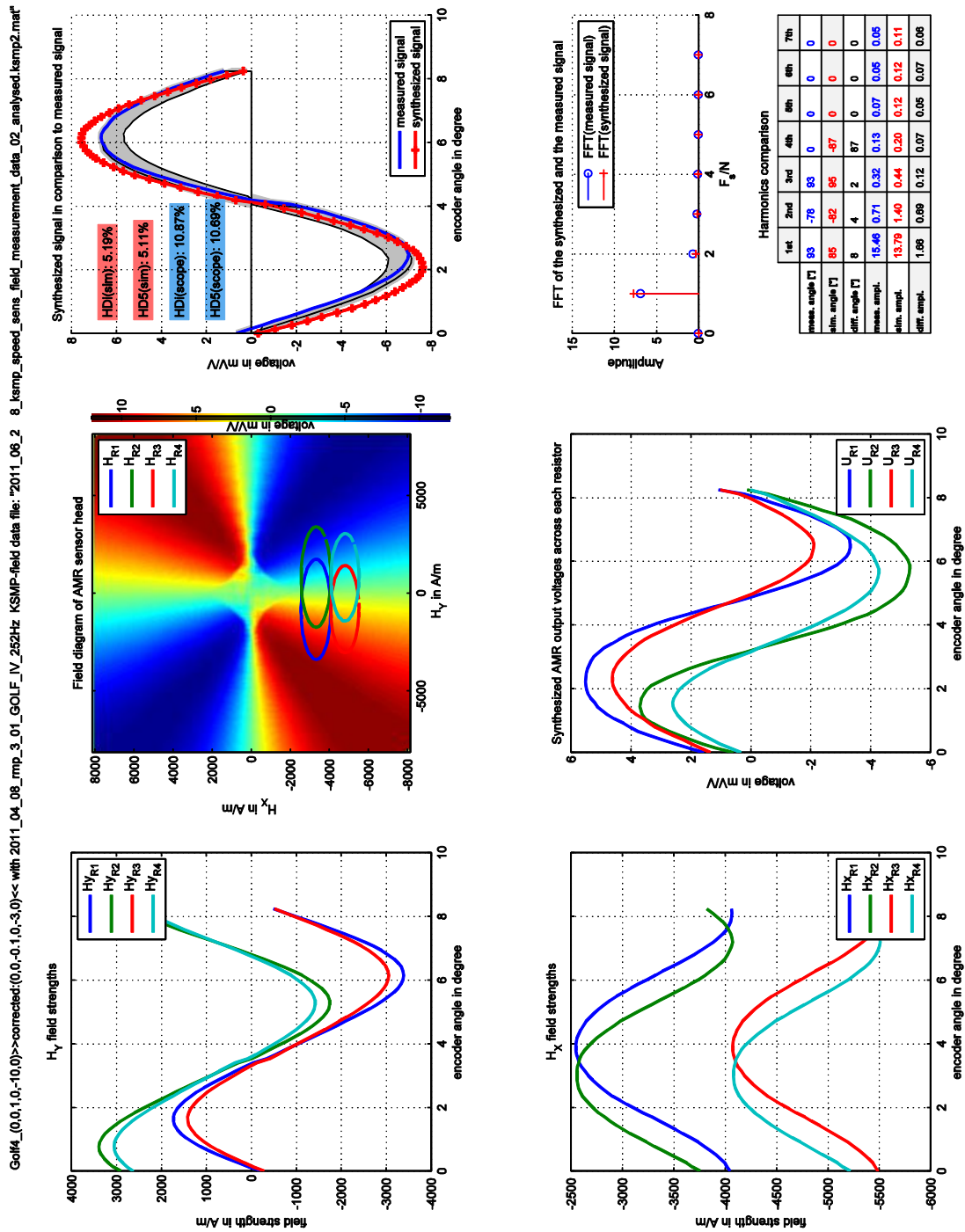
Bild A 27 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,9mm.  $H_x$  hat hier ein stärkeres negatives Offset, wodurch die Ellipsen weiter entfernt vom Kennfeldzentrum liegen. Das Syntheseergebnis stimmt sehr gut mit den Messergebnissen überein.





A 28: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von  $-5^\circ$  um die Y-Achse

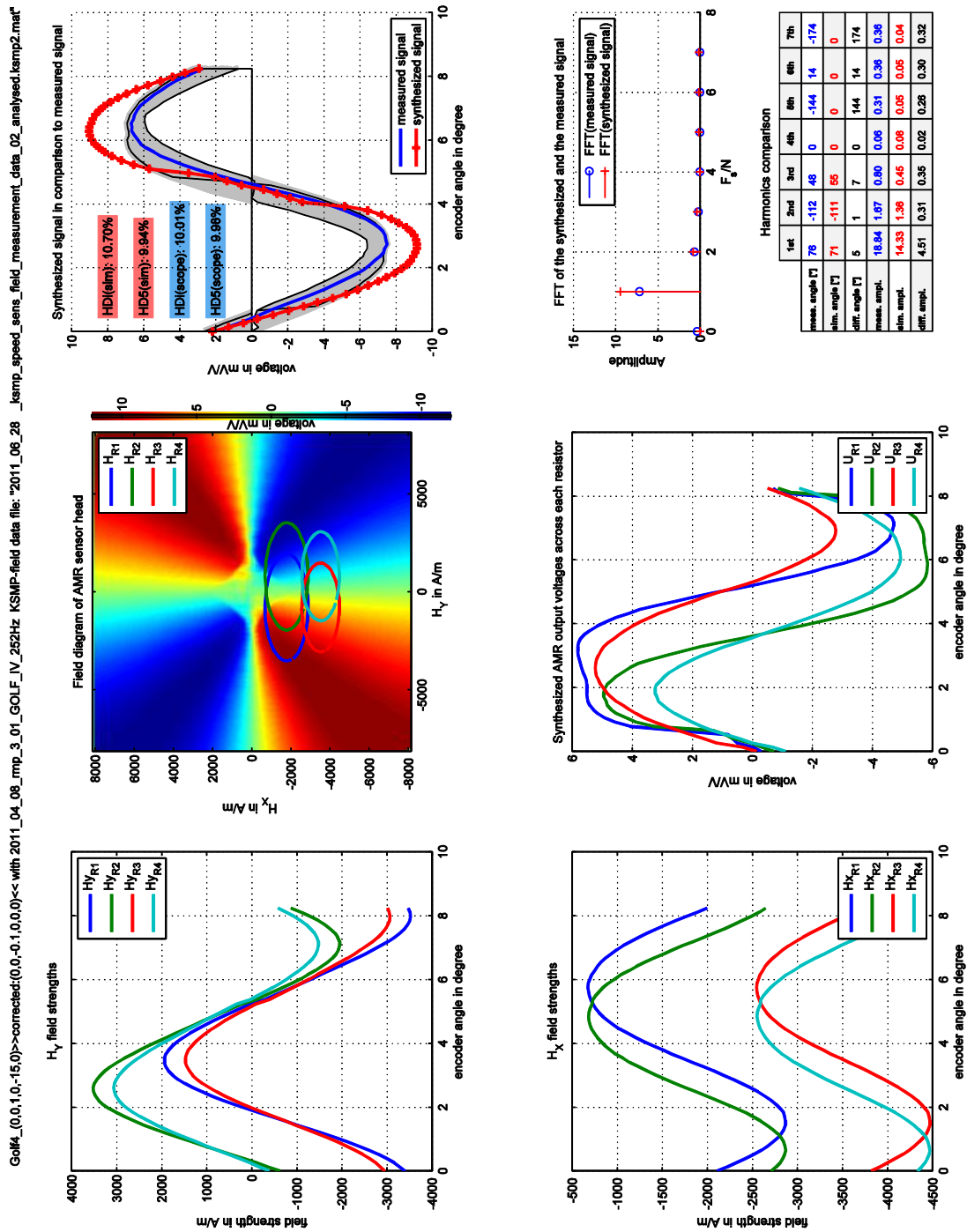
Bild A 28 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -5^\circ$ . Mess- und Syntheseergebnis zeigen eine gute Übereinstimmung. Die HDs weichen um circa 3% voneinander ab. Dies kann zum Beispiel auf Rauschen zurückzuführen sein.



A 29: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von  $-10^\circ$  um die Y-Achse

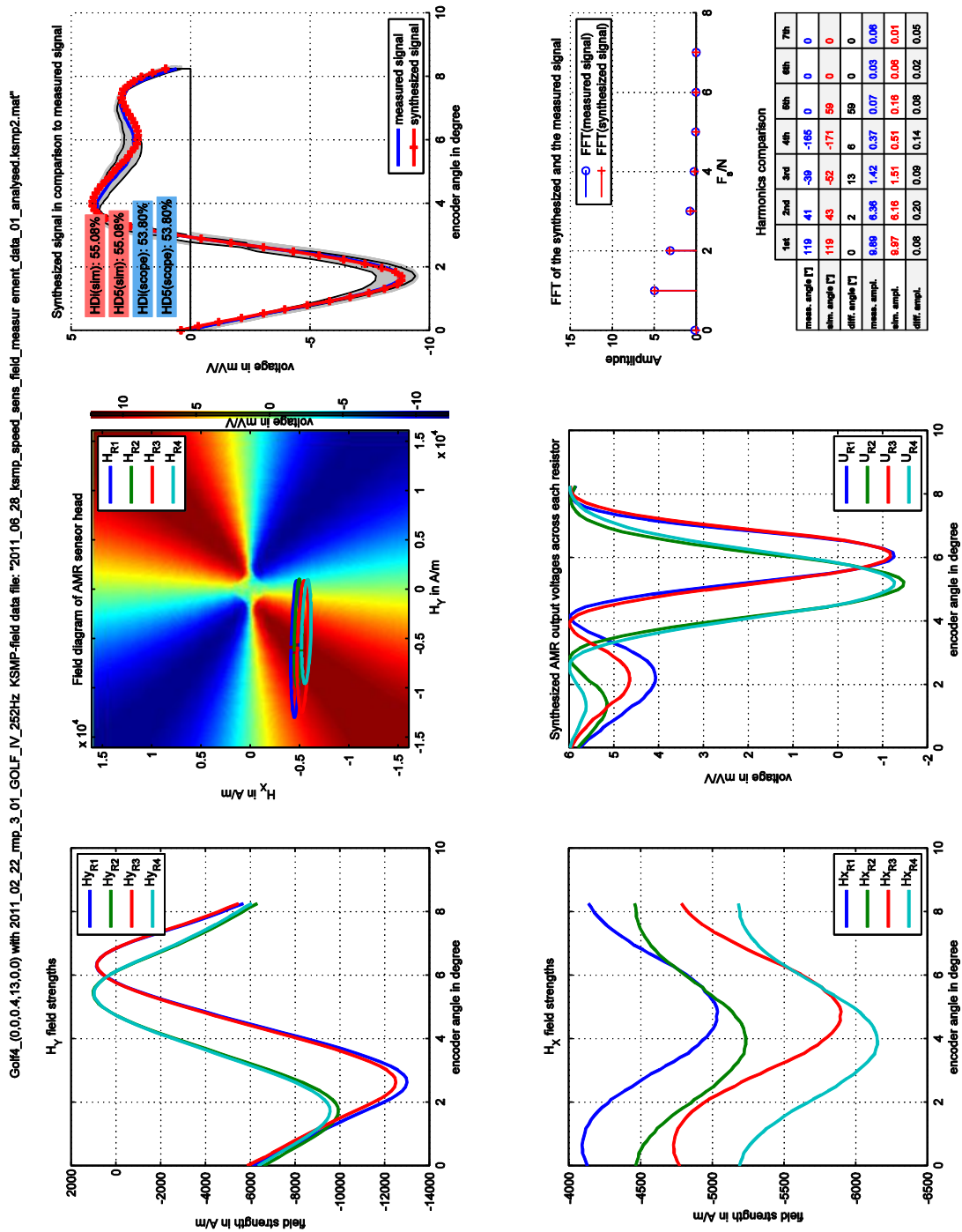
Bild A 29 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -10^\circ$ . Hier zeigt sich eine größere Abweichung zwischen Synthese- und Messergebnis. Damit weichen auch die HDs um circa 5% voneinander ab, was im Wesentlichen in dem Unterschied in der Amplitude begründet liegt. Ferner zeigen sich die bei einer solchen Verkippung typischen Ellipsen.





A 30: Syntheseresult Golf 4 Encoder bei einem Abstand von 0.9mm und einer Verkippung von  $-15^\circ$  um die Y-Achse

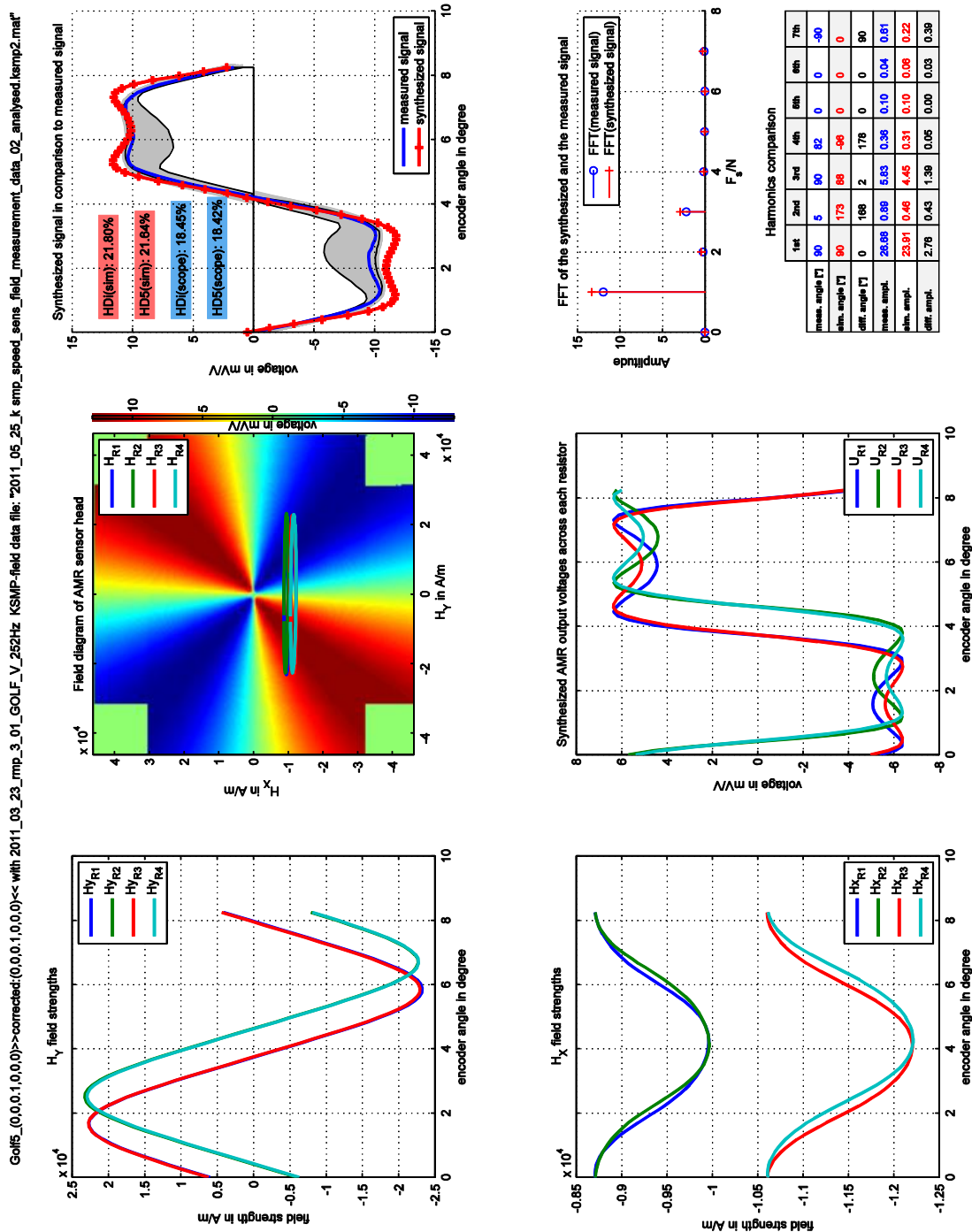
Bild A 30 zeigt das Syntheseresult bei einem Abstand von 0,9mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = -15^\circ$ , die hier auf Grund fehlender Messwerte jedoch nicht winkelkorrigiert ist. Dennoch stimmen die HDs hier jedoch gut überein. Ein zunehmender Abstand bei gleichzeitiger Verkippung muss noch näher untersucht werden.



A 31: Syntheseergebnis Golf 4 Encoderrad bei einem Abstand von 0.4mm und einer Verkippung von 13° um die X-Achse

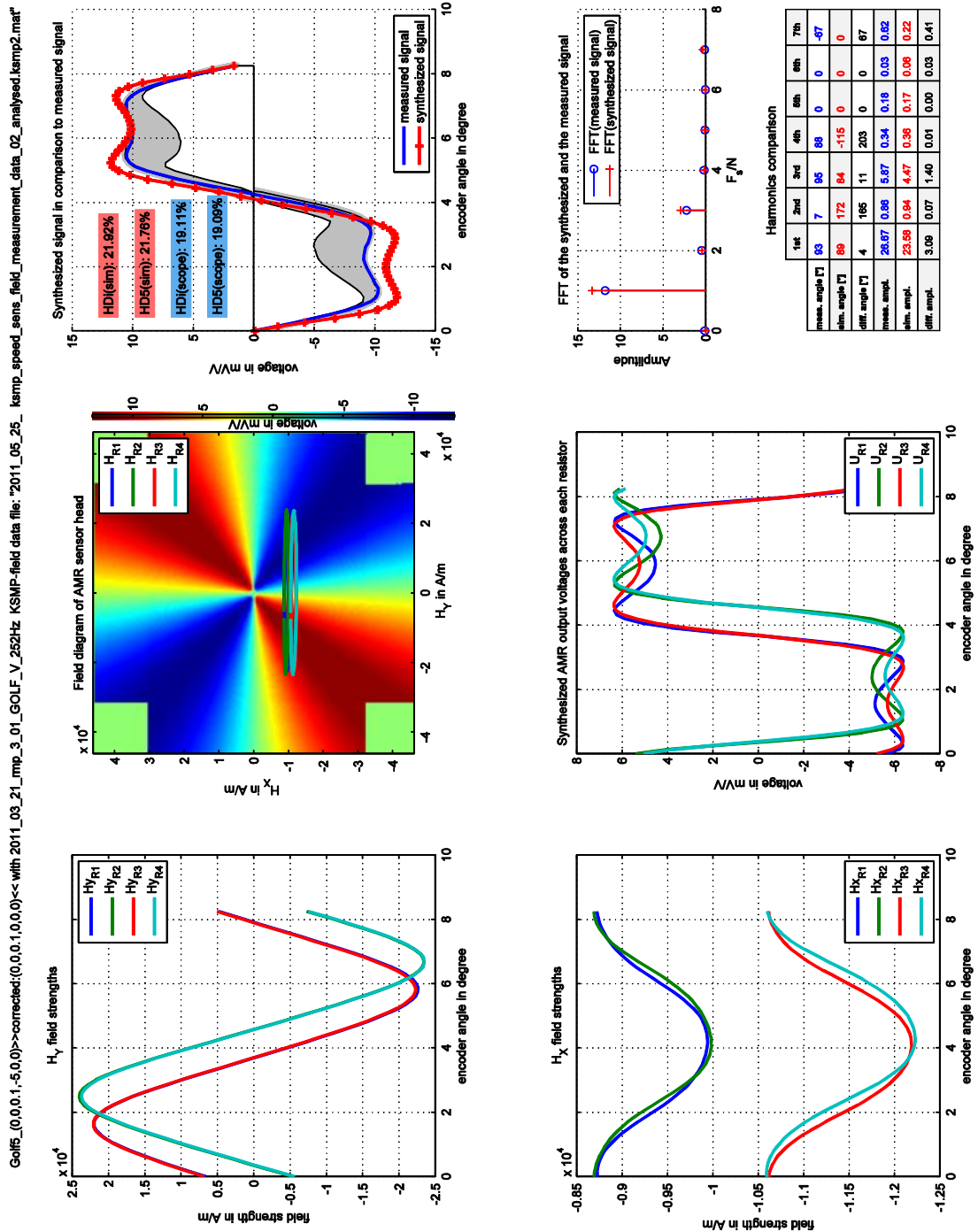
Bild A 31 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,4mm und einer Verkippung von  $\varphi_X = 13^\circ$ . Zu erkennen ist die typische Verschiebung der Ellipsen im Kennfeld. Der Unterschied der HDs liegt bei circa 1,5%.

## Auszug aus den Syntheseergebnissen des Golf 5 Encoderrades



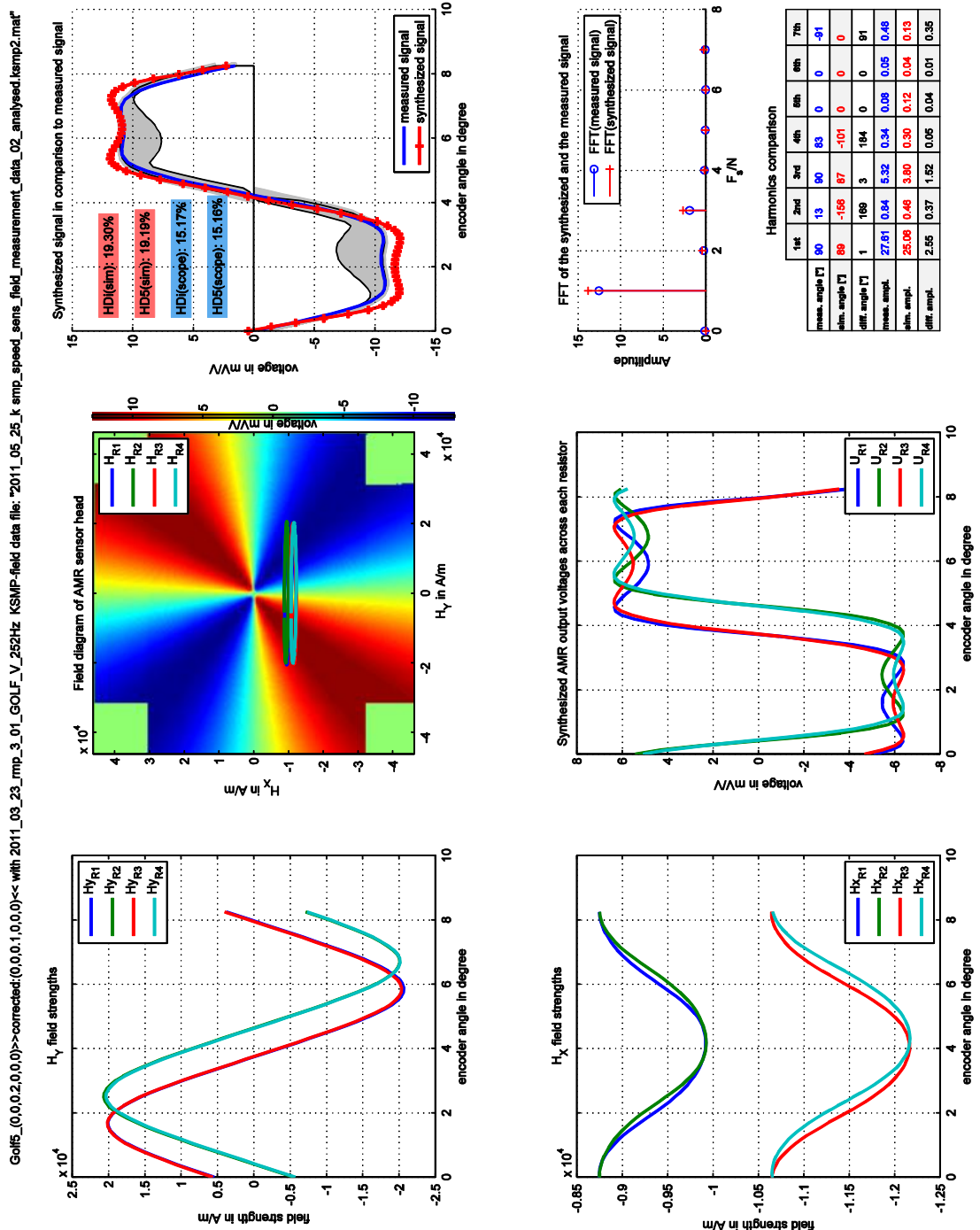
A 32: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm

Bild A 32 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,2mm. Bei dieser nahen Platzierung tritt eine Verzerrung des Signals auf. An dem grauen Bereich um das Messergebnis ist die Schwankung der Messergebnisse auf Grund des defekten Encoderrades erkennbar. Bis auf die Amplitude ähneln sich die Ergebnisse stark.



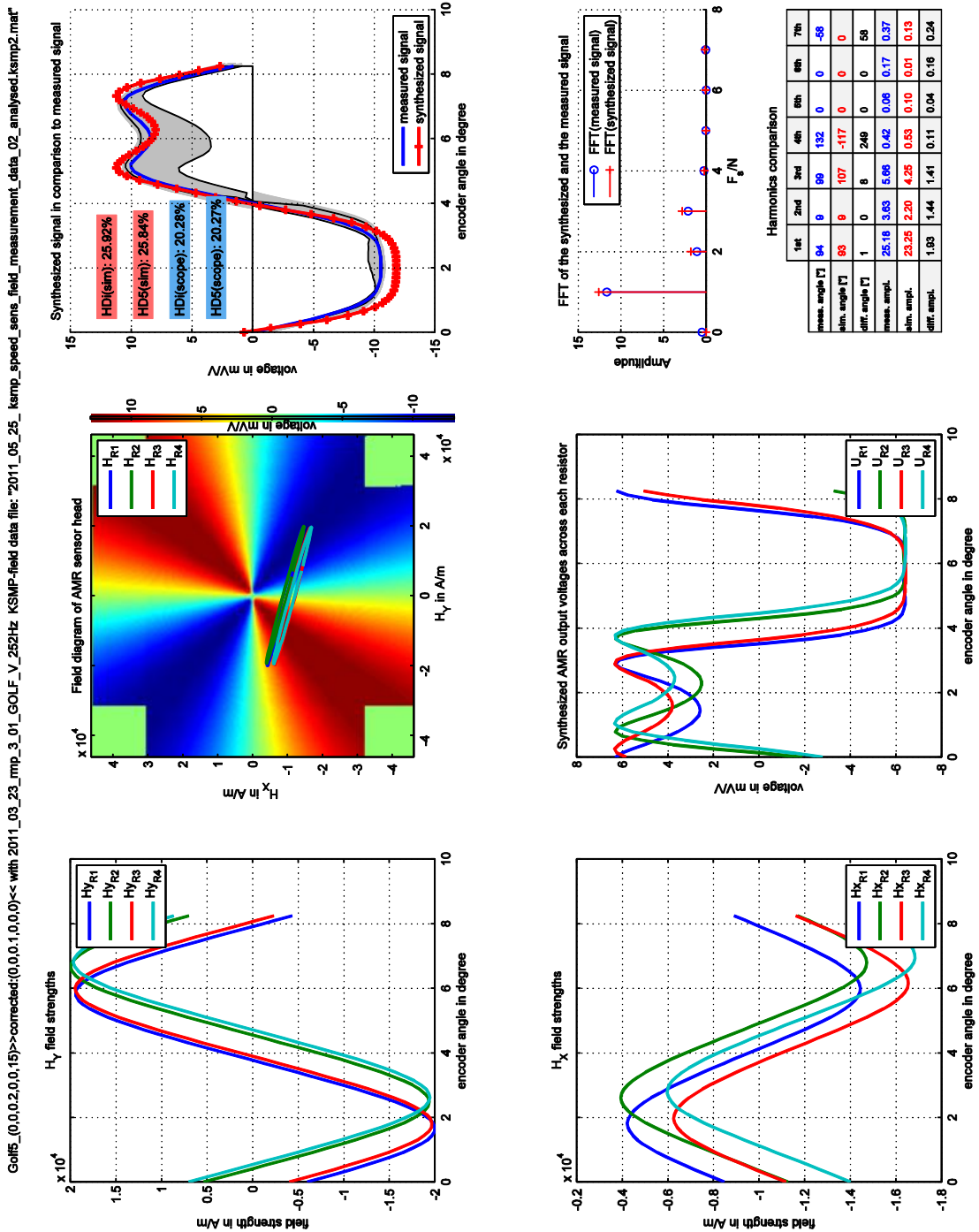
A 33: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.2mm und einer Verkippung von  $-5^\circ$  um die X-Achse

Bild A 33 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,2mm und einer Verkippung von  $\varphi_X = -5^\circ$ . Auch hier stimmt die Signalform des Syntheseergebnisses sehr gut mit der des Messergebnisses überein. Die HDs weichen um circa 2% ab.



A 34: Synthesergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm

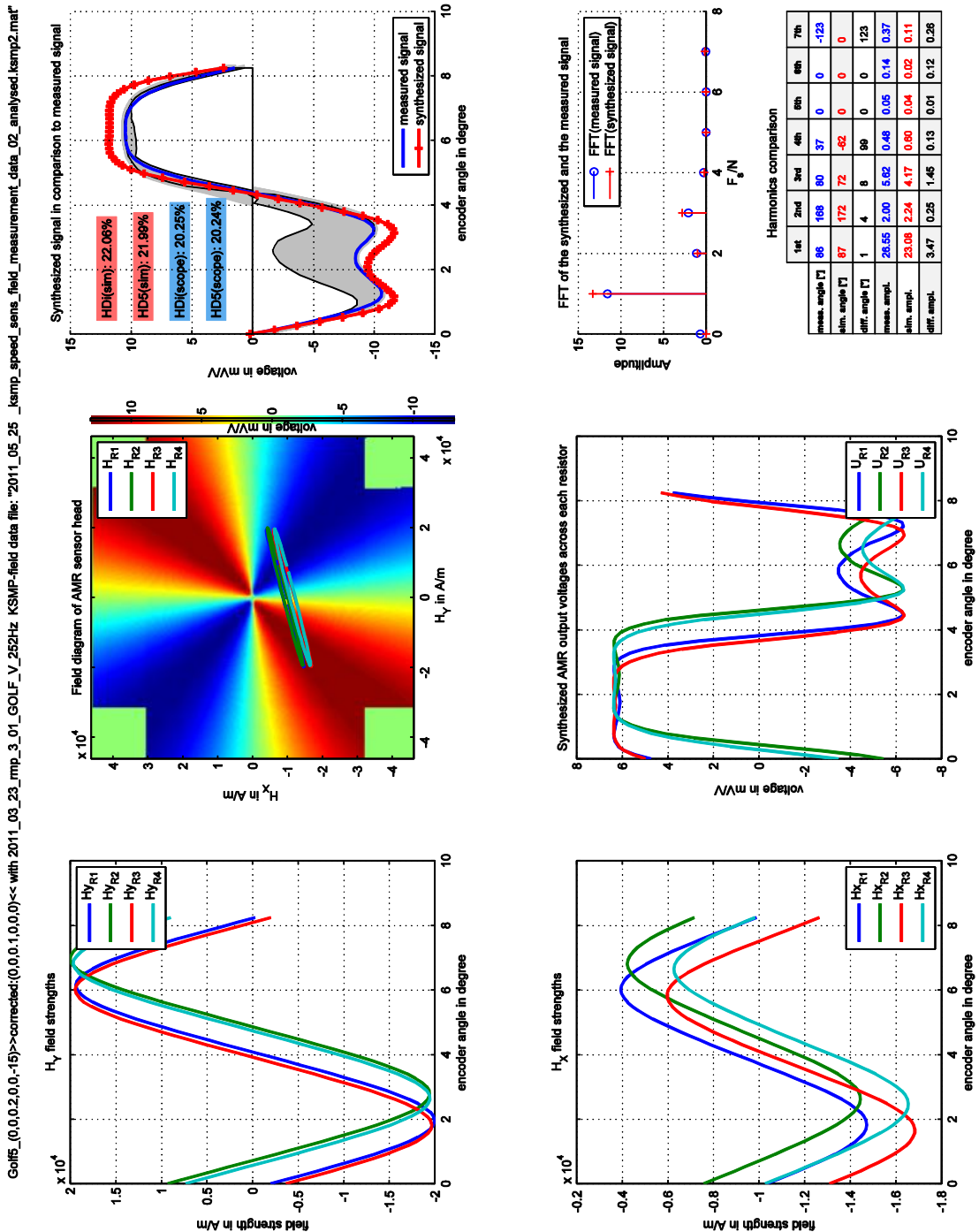
Bild A 34 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,3mm. Hier weicht das Synthesergebnis etwas stärker vom Messergebnis ab. Dies ist zum einen an den HDs, die einen Unterschied von circa 4% aufweisen, zuerkennen und zum anderen beim optischen Vergleich der Signale. Diese Abweichung kann beispielsweise von einem mit einer Verkippung befestigten Sensor im RMP ausgelöst werden. Dennoch ist eine Ähnlichkeit vorhanden.



A 35: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von  $15^\circ$  um die Z-Achse

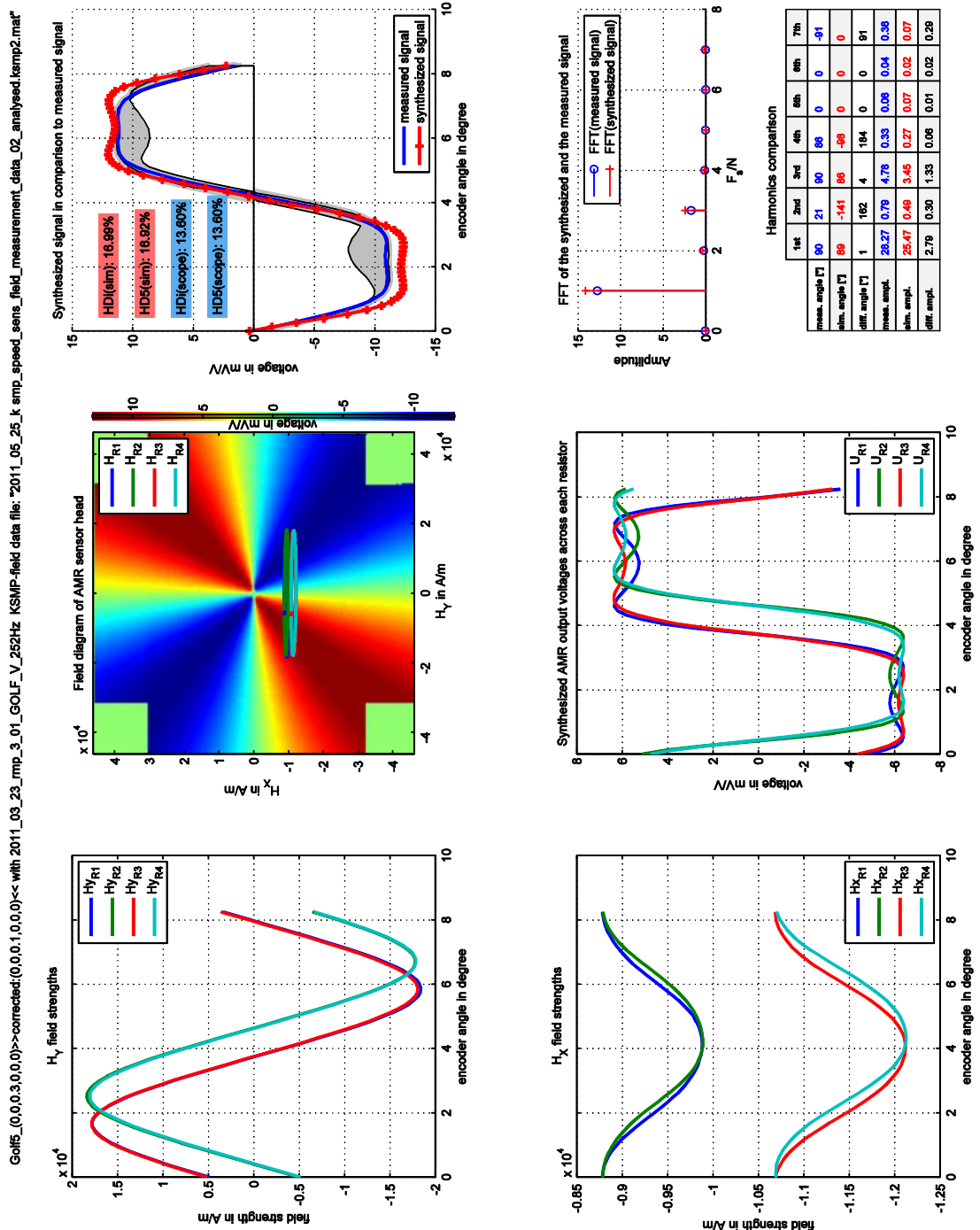
Bild A 35 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,3mm und einer Verkippung von  $\varphi_z = 15^\circ$ . Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die HDs weichen um circa 4% voneinander ab.





A 36: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.3mm und einer Verkippung von  $-15^\circ$  um die Z-Achse

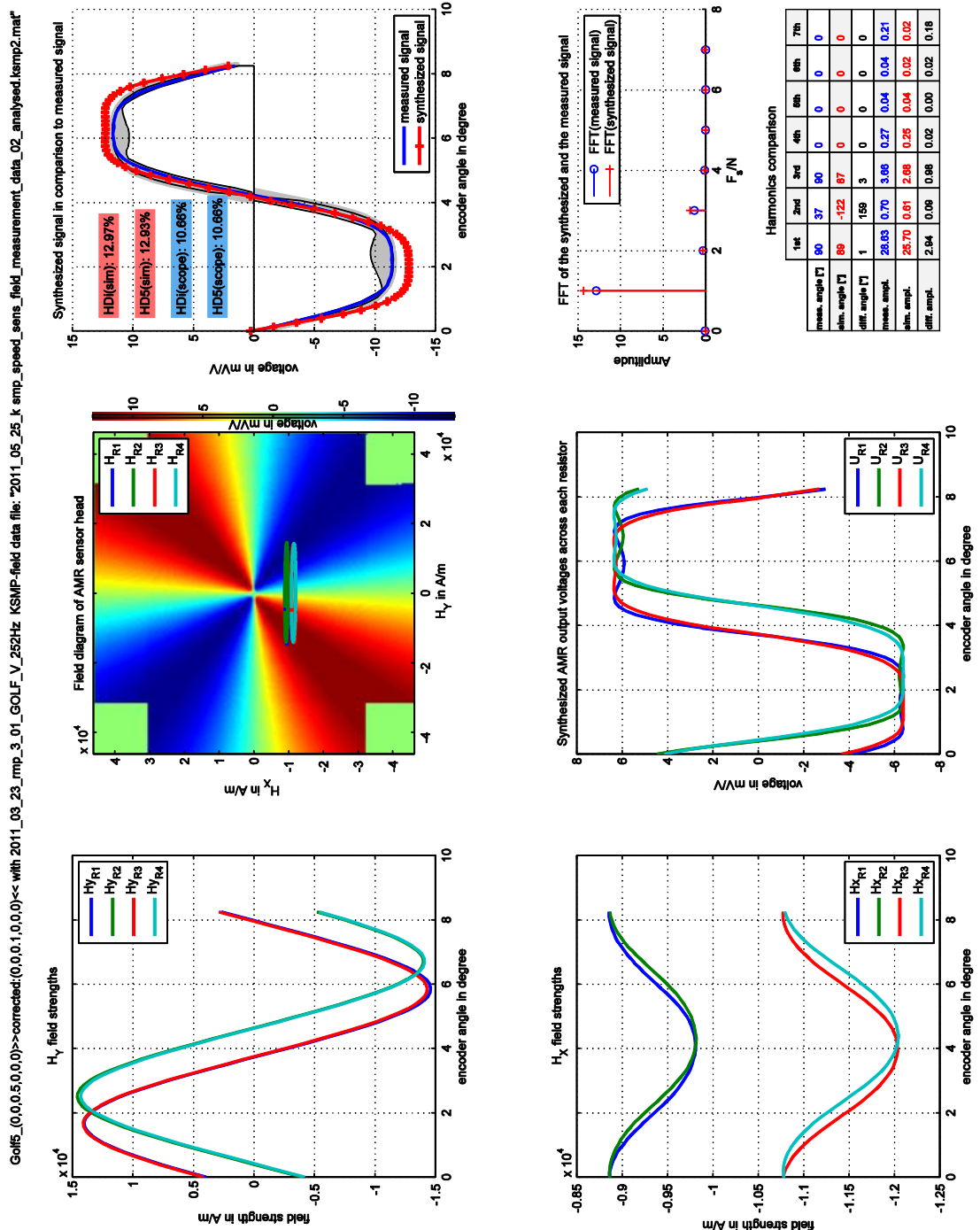
Bild A 36 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,3mm und einer Verkippung von  $\varphi_Z = -15^\circ$ . Auch in der entgegengesetzten Verkippungsrichtung besteht eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse hinsichtlich der Signalform (vgl. Bild A 35). Die HDs weichen jedoch um circa 5% voneinander ab.



A 37: Syntheseresultat Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.4mm

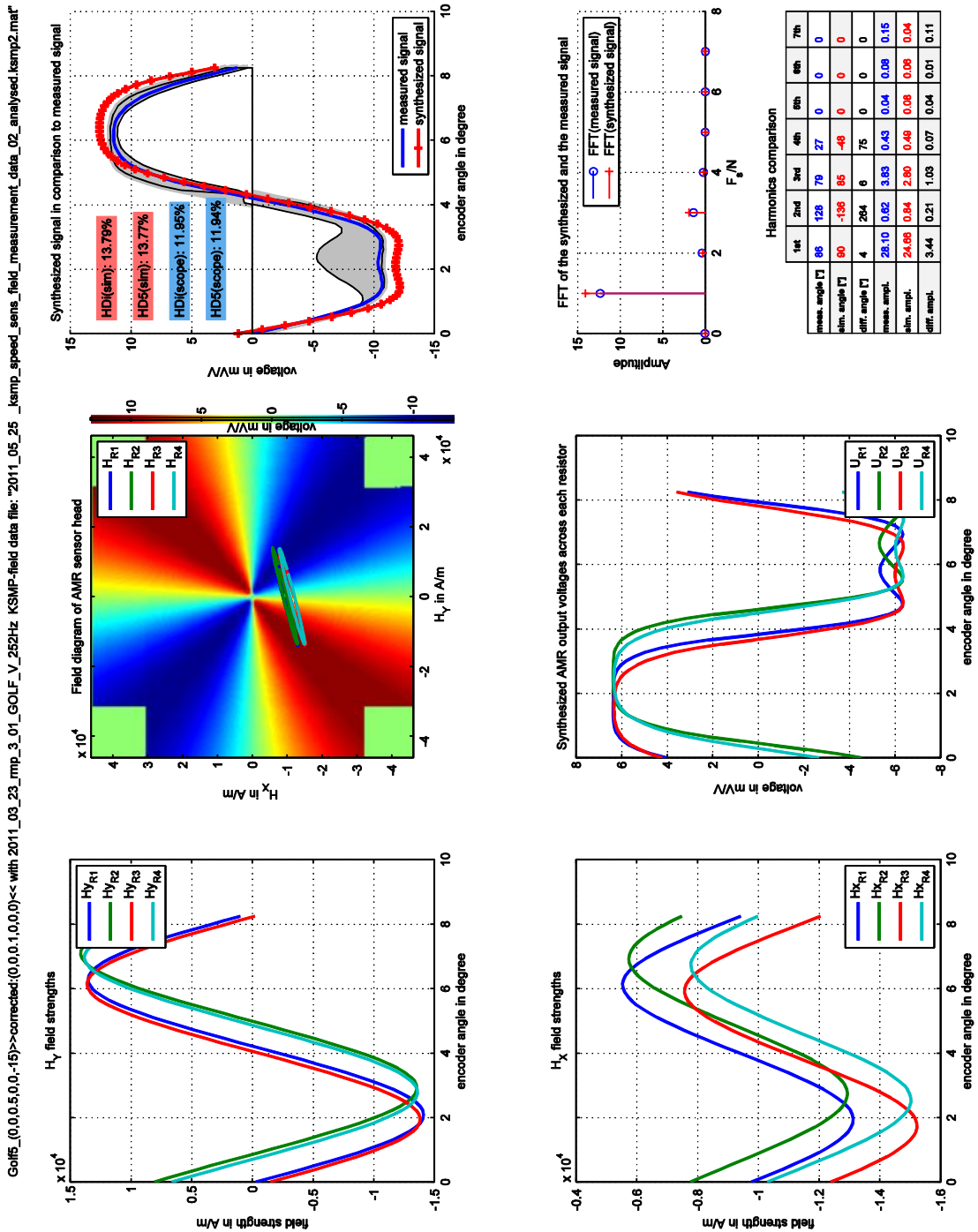
Bild A 37 zeigt das Syntheseresultat bei einem Abstand von 0,4mm. Mit steigender Entfernung sinkt die Abweichung zwischen Synthese- und Messergebnis leicht. Die Signalformen stimmen gut miteinander überein.





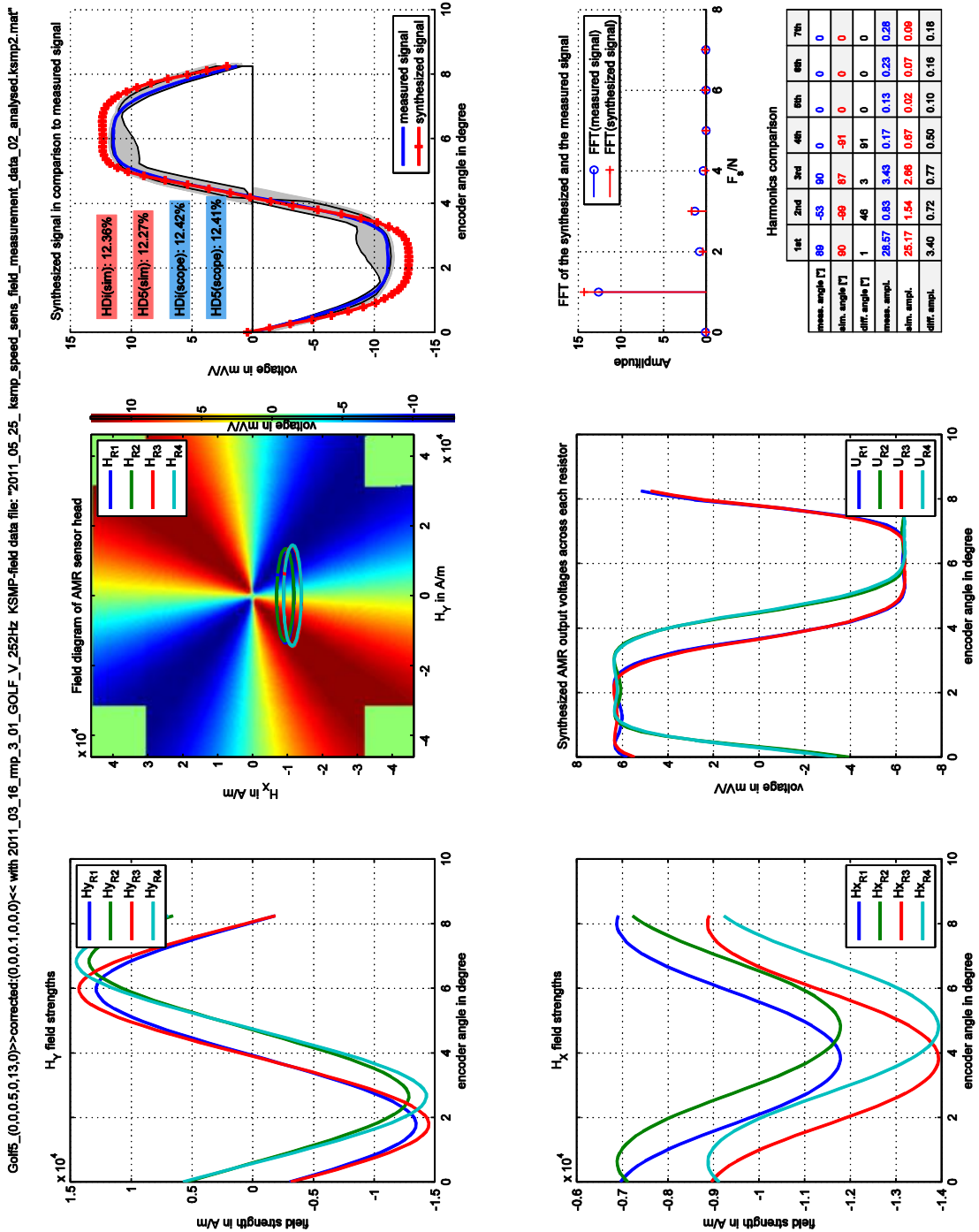
A 38: Synthesergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm

Bild A 38 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,6mm. Wird die Abweichung der Amplitude außer acht gelassen, ähneln sich die Ergebnisse stark.



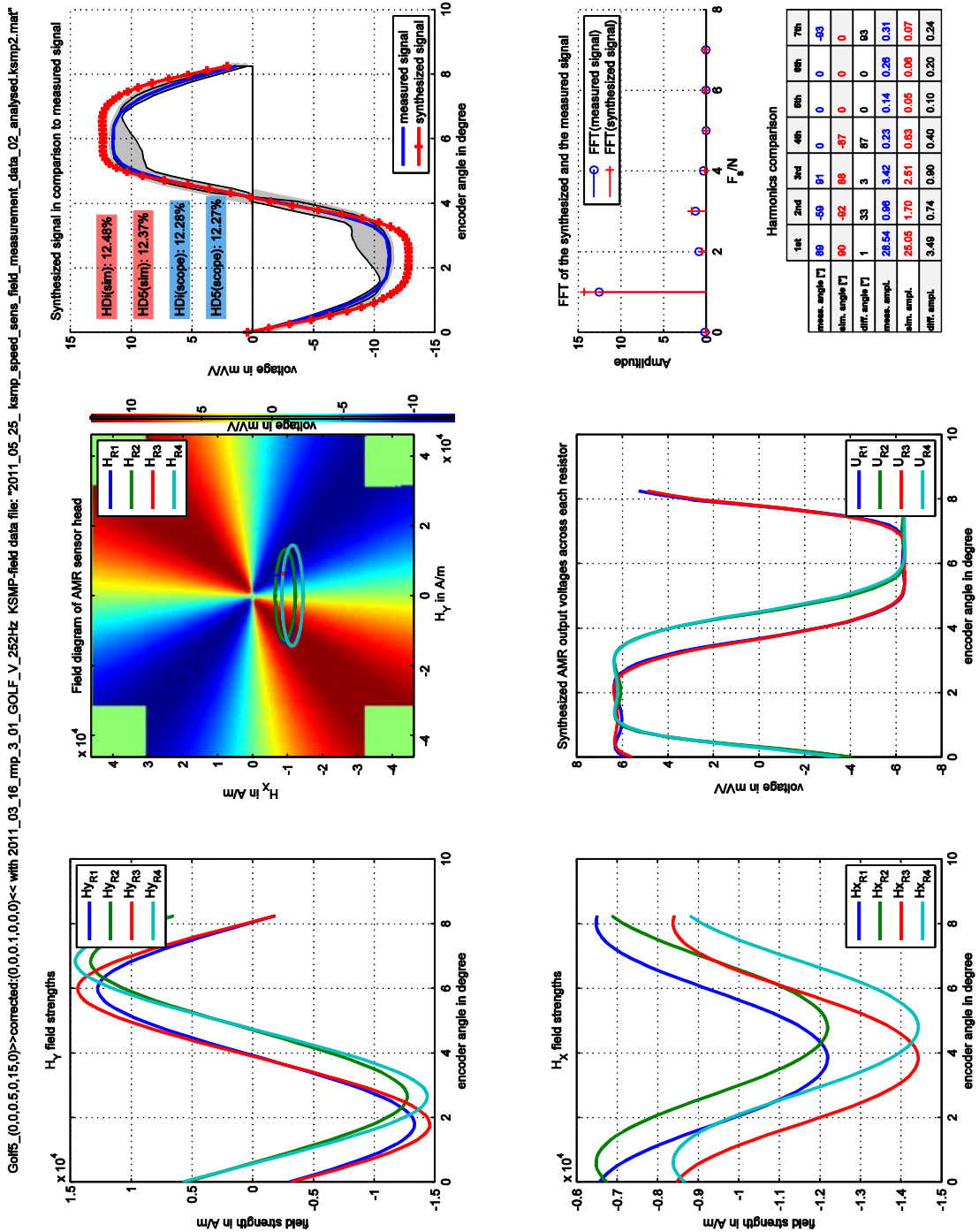
A 39: Syntheseresultat Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von  $-15^\circ$  um die Z-Achse

Bild A 39 zeigt das Syntheseresultat bei einem Abstand von 0,6mm und einer Verkippung von  $\varphi_Z = -15^\circ$ . Wird auch hier die Abweichung der Amplitude außer acht gelassen, ähneln sich die Ergebnisse ebenfalls stark.



A 40: Syntheseergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von  $13^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 40 zeigt das Syntheseergebnis bei einem Abstand von 0,6mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = 13^\circ$ . Die Ellipsen öffnen sich auch bei dem Golf 5 Encoderrad, wenn um die Y-Achse verkippert wird. Dies ist im Kennfeld deutlich zu erkennen. Wenn lediglich die Signalform betrachtet wird, stimmen Mess- und Syntheseergebnis sehr gut überein. Auch das Verhältnis der Oberwellen gleicht dem des Messergebnisses. Dies ist anhand der gleichen HDs zu erkennen.

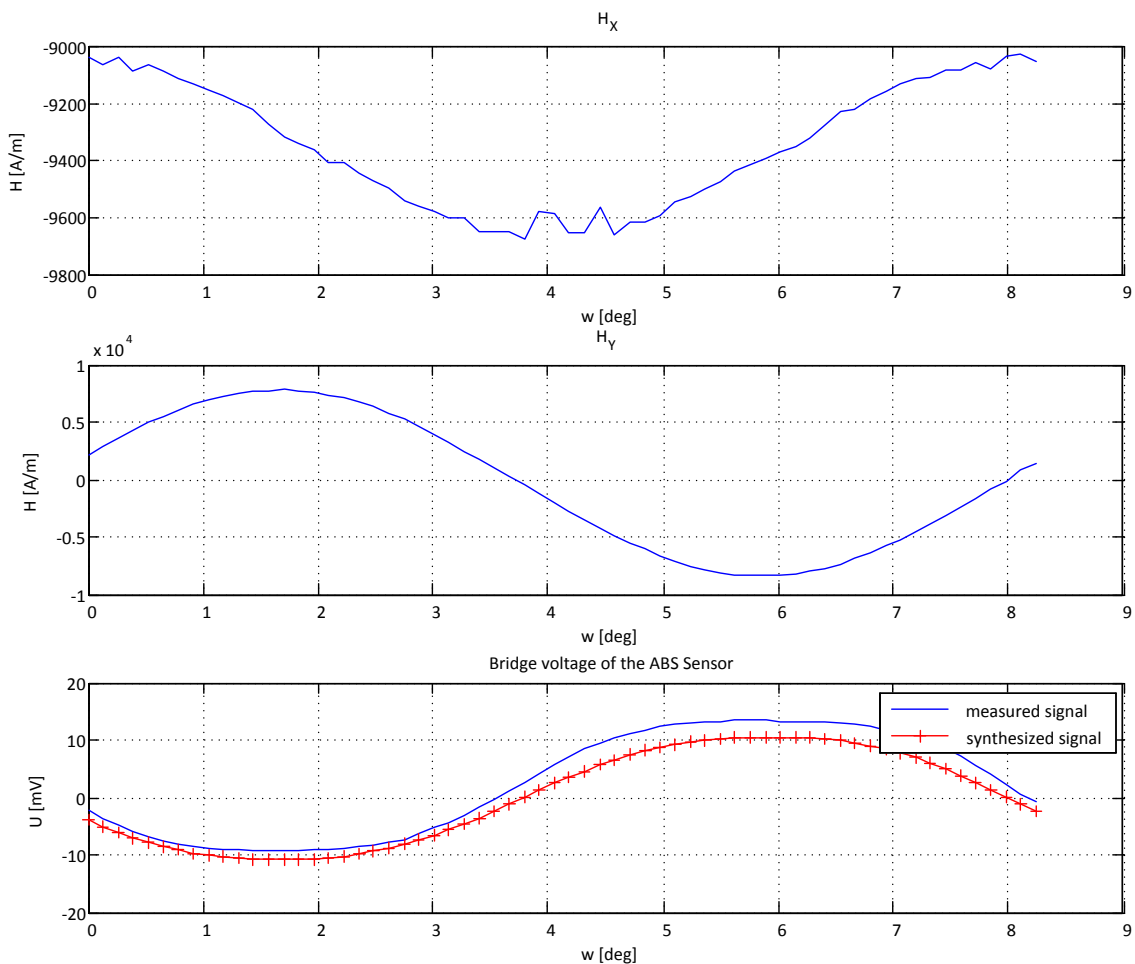


A 41: Synthesergebnis Golf 5 Encoderrad bei einem Abstand von 0.6mm und einer Verkippung von  $15^\circ$  um die Y-Achse

Bild A 41 zeigt das Synthesergebnis bei einem Abstand von 0,6mm und einer Verkippung von  $\varphi_Y = 15^\circ$ . Ein weiteres Verkippen lässt die Ellipsen stärker in Richtung Mitte rücken. Allerdings ist dieser Effekt nicht so stark ausgeprägt wie bei den passiven Encodern. Somit wird eine Frequenzverdopplung auf Grund der Geometrie des Sensors verhindert.

## Plausibilitätsprüfung

Insgesamt zeigen die Syntheseergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Um das Verfahren einem weiteren Test zu unterziehen, sollen an dieser Stelle die simulierten Feldstärken  $H_x$  und  $H_y$  in den KSMP eingespeist werden, in dem sich ein ABS-Sensor befindet. Allerdings wird nun nicht das Kennfeld des Sensors (vgl. Kapitel 3.4) erzeugt, sondern die Brückenspannung unter Einfluss der eingestellten, eben erwähnten Feldstärken gemessen. Als ideales Ergebnis wird hier die Messung der synthetisierten Brückenspannung erwartet. Um eine bestmögliche Einstellung der Feldstärken zu erreichen, werden einzelne Werte über den Funktionsgenerator des KSMP eingespeist und über das Oszilloskop gleichzeitig eine Messung des Stroms durchgeführt. Stimmt der eingestellte mit dem gemessenen Strom nicht überein, so wird dieser mit einem P-Regler nachgeregelt. Als Ausgangswerte der Feldstärken werden die Simulationsergebnisse des Widerstandselementes R1 gewählt. Bild A 42 zeigt das Ergebnis der Messung im KSMP.



A 42: Ergebnis des Tests eines Syntheseergebnisses auf Plausibilität

Die oberen Graphen zeigen die am KSMP eingestellten Feldstärken. Darunter ist das Messsignal in blau und das entsprechende Syntheseergebnis in rot dargestellt. Zwischen

diesen besteht eine erwartungsgemäße Abweichung, da in dem Sensor durch den KSpK ein homogenes Feld erzeugt wird, welches bei der Synthese nicht vorliegt. Dennoch ist zu erkennen, dass die Signalformen eine gute Ähnlichkeit aufweisen. Somit sind die simulierten beziehungsweise synthetisierten Ergebnisse plausibel.

## Anhang B Programmcode

Dieser Anhang stellt lediglich einen Auszug aus den erstellten Programmcodes dar, auf die im Text verwiesen wurde. Alle weiteren erstellten Codes liegen bei Prof.-Dr. Ing. Karl-Ragnar Riemschneider an der HAW in Form einer CD vor.

### B.1 Matlab-Code

Umwandlung der Messdaten des Leitz PMM 654 in eine .dxf Datei:

```
01 data = textread('bmw_3xx_probe=1mm_z=4mm.csv','','delimiter',...
02                 ',' ','emptyvalue',NaN,'headerlines',0);
03
04 probe = 1; % Durchmesser des Tastkopfes
05
06 x=data(:,1);
07 y=data(:,2);
08
09 plot(x,y);
10 axis square;
11
12 dx=max(x)+abs(min(x));
13 dy=max(y)+abs(min(y));
14 %pi*(dx/2)^2
15
16 a=0;
17 cx=0;
18 cy=0;
19
20 % http://paulbourke.net/geometry/polyarea/
21
22 for i=1:length(x)-1
23     %a = a + (x(i)-x(i+1))*(y(i)+y(i+1));
24     a = a + (x(i)*y(i+1))-(x(i+1)*y(i));
25     cx = cx + (x(i)+x(i+1))*(x(i)*y(i+1)-x(i+1)*y(i));
26     cy = cy + (y(i)+y(i+1))*(x(i)*y(i+1)-x(i+1)*y(i));
27 end
28
29 % area
30 a=a/2;
31
32 % centroid
33 cx=cx/(6*a);
34 cy=cy/(6*a);
35 x2=x-cx;
36 y2=y-cy;
37 x2=x;
38 y2=y;
39 rho=sqrt(x2.^2+y2.^2);
40 theta=atan2(y2,x2);
41 rho2=rho-probe/2;
42 polar(theta,rho,'b-');
43 %polar(theta,rho2,'r-');
44
45 %% Schreiben einer dxf Datei mit den korrigierten Daten
46 % Umrechnen in das kartesische System
```

```

47 for i=1:length(rho)
48     koords(i,1) = rho2(i) * cos(theta(i));
49     koords(i,2) = rho2(i) * sin(theta(i));
50     koords(i,3) = 0;
51 end
52 % Anzeige des Ergebnisses der Umrechnung
53 figure('Name','BMW_Encoderrad','NumberTitle','off')
54 plot(koords(:,1), koords(:,2))
55 axis equal
56 % Erzeugen der dxf-Datei
57 fname=inputstr('Name der dxf-Datei (mit Endung)', 'untitled.dxf');
58 % fname=('bmw_3xx.dxf');
59 fid = fopen(fname, 'w');
60
61 X = koords(:,1);
62 Y = koords(:,2);
63 Z = koords(:,3);
64 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
65 % quelle:
66 % http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/
67 %         4895-dxf-export-for-3d-line-elements
68 % 02.05.2011 leicht verändert S.Zippel
69 fprintf(fid, '999\ncreated by Matlab\n 0\nSECTION\n 2\nENTITIES\n 0\n');
70 for a=1:length(X)-1
71     % create new line element
72     fprintf(fid, 'LINE\n 8\n 0\n');
73     % first coordinate triple - starting point of line-element
74     fprintf(fid, '10\n %.4f\n 20\n %.4f\n 30\n %.4f\n', X(a), Y(a), Z(a));
75     % second coordinate triple - ending point of line-element
76     fprintf(fid, '11\n %.4f\n 21\n %.4f\n 31\n %.4f\n', X(a+1), Y(a+1), Z(a+1));
77     % line end
78     fprintf(fid, ' 0\n');
79 end
80 fprintf(fid, 'ENDSEC\n 0\nEOF\n');
81 fclose(fid);
82 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
83 disp(['Die Datei ' fname ' wurde erzeugt.'])

```

## Matlabcode der Auswerte Funktion

```

01 function rmp_ksmp_fusion_gui_fctn(rmp_measurement_dir,...
02                                 simulation_data_file,...
03                                 x, y, phi_x, phi_y ,phi_z,...
04                                 varargin)
05 clc
06 %% prescript
07 % shall the measurement data be loaded
08 % normaly 'true' but helpful during development of the script
09 % or if another ksmp field shall be used for the same measurement
10 % data
11 load_rmp_data = true;
12
13 % shall a combi plot be made
14 combi_plot = true;
15
16 type_folder=rmp_measurement_dir;
17
18 h=[];
19
20 % default values for varargin
21 save_figures = true;
22 rotate_field = false;
23 ksmp_field_user = false;

```



```
024 ksmp_better_res=false;
025 plot_channel = true;
026 plot_text = true;
027 plot_same_axis = false;
028 plot_measurement = true;
029 plot_shift_measurement = false;
030 hx_multiplier = 1;
031 hy_multiplier = 1;
032 shifting = false;
033 shiftwidth = 0;
034 find_fit = true;
035 search_best_field = false;
036 change_direction = false;
037 ksmp_field_name = [];
038 load_from_matlab_db = false;
039
040 for i=1:1:size(varargin,2)
041     if strcmp(varargin{i},'debug')
042         % switch for debug mode
043         debug=varargin{i+1};
044     elseif strcmp(varargin{i},'saving')
045         % switch to enable or disable the question for
046         % saveing the figure
047         save_figures = varargin{i+1};
048     elseif strcmp(varargin{i},'ksmp_user_field')
049         ksmp_field_name = varargin{i+1};
050         % if there is a choosen KSMP field no other will
051         % be searched
052         ksmp_field_search=false;
053         ksmp_field_user=true;
054     elseif strcmp(varargin{i},'rotate_ksmp_field')
055         % shall the ksmp field be rotated?
056         rot_angle = varargin{i+1}; % angle in degree
057         rotate_field = true;
058     elseif strcmp(varargin{i},'ksmp_field_better_res')
059         ksmp_better_res=varargin{i+1};
060     elseif strcmp(varargin{i},'hx_offset')
061         % shall an offset be applied to the H_x field?
062         % normaly NOT because the original dataset is MODIFIED!!!
063         hx_multiplier=varargin{i+1};
064         hx_offset = true;
065     elseif strcmp(varargin{i},'hy_offset')
066         hy_multiplier=varargin{i+1};
067         hy_offset = true;
068     elseif strcmp(varargin{i},'shifting')
069         shiftwidth=varargin{i+1};
070         shifting = true;
071     elseif strcmp(varargin{i},'find_fit')
072         find_fit = varargin{i+1};
073     elseif strcmp(varargin{i},'change_direction')
074         change_direction = varargin{i+1};
075     elseif strcmp(varargin{i},'plot_channel')
076         plot_channel = varargin{i+1};
077     elseif strcmp(varargin{i},'plot_text')
078         plot_text = varargin{i+1};
079     elseif strcmp(varargin{i},'plot_same_axis')
080         plot_same_axis = varargin{i+1};
081     elseif strcmp(varargin{i},'plot_measurement')
082         plot_measurement = varargin{i+1};
083     elseif strcmp(varargin{i},'plot_shift_measurement')
084         plot_shift_measurement = varargin{i+1};
085     elseif strcmp(varargin{i},'ksmp_field_search')
086         % shall the best ksmp_field be searched?
```

```
087         search_best_field = varargin{i+1};
088     elseif strcmp(varargin{i}, 'additional_offsets')
089         % shall the best ksmp_field be searched?
090         x_cor = varargin{i+1}.x_cor;
091         y_cor = varargin{i+1}.y_cor;
092         phi_x_cor = varargin{i+1}.phi_x_cor;
093         phi_y_cor = varargin{i+1}.phi_y_cor;
094         phi_z_cor = varargin{i+1}.phi_z_cor;
095     elseif strcmp(varargin{i}, 'extend_name')
096         name_extension = varargin{i+1};
097     elseif strcmp(varargin{i}, 'load_from_matlab_db')
098         load_from_matlab_db = varargin{i+1};
099     elseif strcmp(varargin{i}, 'simulation_data')
1000         simu_db = varargin{i+1};
1001     end
1002 end
1003
1004 if load_from_matlab_db
1005     simu = simu_db{1};
1006 else
1007     simu = 0;
1008 end
1009 %%
1010 save_figures=true;
1011 %%
1012 % get the path to the KSMP fields and the folder to store the
1013 % results in
1014 [ksmp_field_dirname, folder2savefigs]=...
1015         get_ksmp_field_folder_name(ksmp_better_res);
1016
1017 % fill up a struct which holds all nessesary information about
1018 % the simulation
1019 fusion_mat = struct('x', x,...
1020         'y', y,...
1021         'phi_x', phi_x,...
1022         'phi_y', phi_y,...
1023         'phi_z', phi_z,...
1024         'fem_file', simulation_data_file);
1025
1026 %% load the measured data
1027 if load_rmp_data
1028     [u_diff, u_diff_zc_falling_idx]=...
1029         load_rmp_dataset(fusion_mat,...
1030             type_folder);
1031 end
1032
1033 %% load ksmp field diagram
1034 [hy_axis, hx_axis, hx_hy_field, field_name] =...
1035         load_ksmp_field_diagram(...
1036             search_best_field,...
1037             fusion_mat,...
1038             ksmp_better_res,...
1039             rotate_field,...
1040             rot_angle,...
1041             ksmp_field_name,...
1042             hx_multiplier,...
1043             hy_multiplier,...
1044             ksmp_field_dirname,...
1045             ksmp_field_user,...
1046             load_from_matlab_db,...
1047             simu);
1048 %%
1049 if ~load_from_matlab_db
```

```
0150     simu_orig=cst_import_sim_data(fusion_mat.fem_file);
0151     simu = simu_orig;
0152 end
0153
0154 if change_direction
0155     simu = change_rotational_direction(simu);
0156 end
0157
0158 if length(simu.w) < 32
0159     simu = interpolate_fields(simu, 4);
0160 end
0161
0162 if find_fit
0163     candidates_keeper = struct();
0164     candidates = struct();
0165     candidates.shift_step = struct();
0166     % the end of the circshift
0167     shift_steps = length(simu.r1_hx_sens)-1;
0168     shift_wb = ...
0169     waitbar(0,'Suche...','Name', 'Suche beste Phase&Periode');
0170 else
0171     shift_steps=1;
0172 end
0173
0174 % if there is a known offset for the Hx values it can be
0175 % corrected here by using the 'hx_offset' switch and the
0176 % 'hx_multiplier' value which can be found in the 'prescript'
0177 if hx_offset && (hx_multiplier~=1)
0178     simu.r1_hx_sens = simu.r1_hx_sens.*hx_multiplier;
0179     simu.r2_hx_sens = simu.r2_hx_sens.*hx_multiplier;
0180     simu.r3_hx_sens = simu.r3_hx_sens.*hx_multiplier;
0181     simu.r4_hx_sens = simu.r4_hx_sens.*hx_multiplier;
0182 end
0183
0184 if hy_offset && (hy_multiplier~=1)
0185     simu.r1_hy_sens = simu.r1_hy_sens.*hy_multiplier;
0186     simu.r2_hy_sens = simu.r2_hy_sens.*hy_multiplier;
0187     simu.r3_hy_sens = simu.r3_hy_sens.*hy_multiplier;
0188     simu.r4_hy_sens = simu.r4_hy_sens.*hy_multiplier;
0189 end
0190
0191 % get the maximum angle of the simulated data
0192 max_winkel=simu.w(end);
0193
0194 % if the simulated data shall be hand shifted by a known offset
0195 % the 'shifting' switch and the 'shiftwidth' value can be used
0196 % which can be found in the 'prescript' section
0197 if shifting
0198     simu.r1_hx_sens=circshift(simu.r1_hx_sens,shiftwidth);
0199     simu.r1_hy_sens=circshift(simu.r1_hy_sens,shiftwidth);
0200     simu.r2_hx_sens=circshift(simu.r2_hx_sens,shiftwidth);
0201     simu.r2_hy_sens=circshift(simu.r2_hy_sens,shiftwidth);
0202     simu.r3_hx_sens=circshift(simu.r3_hx_sens,shiftwidth);
0203     simu.r3_hy_sens=circshift(simu.r3_hy_sens,shiftwidth);
0204     simu.r4_hx_sens=circshift(simu.r4_hx_sens,shiftwidth);
0205     simu.r4_hy_sens=circshift(simu.r4_hy_sens,shiftwidth);
0206 end
0207 simu_orig = simu;
0208
0209 for step=1:shift_steps
0210
0211     % get the simulation data
0212     simu = simu_orig;
```

```
0213
0214     if find_fit
0215         waitbar(step / shift_steps)
0216     end
0217
0218     if shift_steps == 1
0219         shiftoffset = 0; % if no shift shall be done
0220     else
0221         shiftoffset=-step; % otherwise try all possible shifts
0222     end
0223     %
0224
0225
0226     % if there is shift to be done, do it
0227     if shiftoffset ~=0
0228         simu.r1_hx_sens=circshift(simu.r1_hx_sens,shiftoffset);
0229         simu.r1_hy_sens=circshift(simu.r1_hy_sens,shiftoffset);
0230         simu.r2_hx_sens=circshift(simu.r2_hx_sens,shiftoffset);
0231         simu.r2_hy_sens=circshift(simu.r2_hy_sens,shiftoffset);
0232         simu.r3_hx_sens=circshift(simu.r3_hx_sens,shiftoffset);
0233         simu.r3_hy_sens=circshift(simu.r3_hy_sens,shiftoffset);
0234         simu.r4_hx_sens=circshift(simu.r4_hx_sens,shiftoffset);
0235         simu.r4_hy_sens=circshift(simu.r4_hy_sens,shiftoffset);
0236     end
0237
0238     w=simu.w;
0239
0240     % calculate the result, so to speak the simulated u_b
0241     if step == 1
0242         % interpolate the voltage out of the field diagram
0243         u_r1 = interp2(hy_axis, hx_axis,...
0244             hx_hy_field, simu.r1_hy_sens, simu.r1_hx_sens);
0245         u_r2 = interp2(hy_axis, hx_axis,...
0246             hx_hy_field, simu.r2_hy_sens, simu.r2_hx_sens);
0247         u_r3 = interp2(hy_axis, hx_axis,...
0248             hx_hy_field, simu.r3_hy_sens, simu.r3_hx_sens);
0249         u_r4 = interp2(hy_axis, hx_axis,...
0250             hx_hy_field, simu.r4_hy_sens, simu.r4_hx_sens);
0251         %     end
0252
0253         % convert from mV to V
0254         % u_avg=u_avg./1000;
0255         u_r1=u_r1./1000./2.*1000;
0256         u_r2=u_r2./1000./2.*1000;
0257         u_r3=u_r3./1000./2.*1000;
0258         u_r4=u_r4./1000./2.*1000;
0259
0260         % calculate half bridge and bridge voltage
0261         u_x=0.5.*1000;
0262         u_3=1./( 1 + ((u_x+u_r1)./(u_x-u_r3)) ); % orig
0263         u_4=1./( 1 + ((u_x-u_r2)./(u_x+u_r4)) ); % orig
0264         u_b=(u_3-u_4); %orig
0265         u_b=u_b.*1000;
0266
0267         % ub-offset deletion
0268         u_b = u_b - mean(u_b);
0269         [u_b_hd5 u_b_hdi] = hdi_cst(u_b);
0270         u_diff_hdi = hdi_cst(u_diff);
0271     else
0272         u_b = circshift(u_b,shiftoffset);
0273     end
0274
0275     if u_diff_hdi < 0.99
```

```

0276         num_of_per = numel(u_diff_zc_falling_idx)-1;
0277     else
0278         num_of_per = ...
0279             (length(u_diff)-u_diff_zc_falling_idx(1))/19700;
0280     end
0281
0282     % find the best suiting period out of the measured dataset
0283     % for all periods
0284     for number=1:num_of_per
0285         % load the data of the current period
0286         if u_diff_hdi < 0.99
0287             if (u_diff_zc_falling_idx(number+1)-...
0288                 u_diff_zc_falling_idx(number)) < 22000 && ...
0289                 (u_diff_zc_falling_idx(number+1)-...
0290                 u_diff_zc_falling_idx(number)) > 18500
0291                 temp = ...
0292                 (u_diff(u_diff_zc_falling_idx(number):...
0293                     u_diff_zc_falling_idx(number+1)))';
0294             else
0295                 try
0296                     temp = ...
0297                         (u_diff(u_diff_zc_falling_idx(number):...
0298                             u_diff_zc_falling_idx(number)+19700))';
0299                 catch
0300                     temp = ...
0301                         (u_diff(u_diff_zc_falling_idx(1):...
0302                             u_diff_zc_falling_idx(1)+19700))';
0303                 end
0304             end
0305         else
0306             temp = ...
0307                 u_diff(u_diff_zc_falling_idx+19700*(number-1):...
0308                     u_diff_zc_falling_idx+19700*number)';
0309         end
0310         % store the data to the struct
0311         candidates(number).per=temp;
0312         % get the length of the current period data
0313         candidates(number).len=length(temp);
0314         % take only that much points out of the measured data that
0315         % the new curve has the same length as the simulated data
0316         candidates(number).per_small=...
0317         (candidates(number).per(1:ceil(candidates(number).len/length(u_b)):end
0318         ));
0319         if step == 1
0320             % compute the HDi and HD5 of every small periode
0321             [candidates(number).per_small_HD5...
0322             candidates(number).per_small_HDi] = ...
0323             hdi_cst(candidates(number).per_small);
0324         end
0325         % calculate the difference between these two datasets the
0326         % smaller the difference the better the curves a fitting
0327         candidates(number).diff=...
0328             (candidates(number).per_small+u_b).^2;
0329         % calculate the sum of the differences
0330         candidates(number).diff_sum=sum(candidates(number).diff);
0331     end
0332
0333     % load all the calculated sum of differences into a vector
0334     fit_idx_tmp=zeros(length(candidates),1); % allocate memory
0335     for number=1:size(candidates,2)
0336         fit_idx_tmp(number) = candidates(number).diff_sum;
0337     end

```

```
0337
0338 % the periode with the smallest error sum has the smallest over
0339 % all error, pre calculate the best candidate of this shift
0340 [val p_num]=min(fit_idx_tmp);
0341 % store the index of the best candidate in the last one of the
0342 % current shift step
0343 candidates(end).fit_idx=p_num;
0344 candidates(end).fit_idx_val=val;
0345
0346 clear number temp fit_idx_tmp
0347 % store all the candidates of the current shift step
0348 candidates_keeper(step).candidates=candidates;
0349 end
0350
0351 % all possible shifts and perodes where calculated, search all
0352 % thecandidates for the best of the candidates
0353 if find_fit
0354     close(shift_wb);
0355     % search the smallest difference between the best candidates
0356     % of each shift step and the simulated signal, by storing
0357     % them all to a vector and get the index of the minimum
0358     for step=1:shift_steps
0359         best_fit_vec(step)=...
0360             candidates_keeper(step).candidates(end).fit_idx_val;
0361     end
0362     [abw shift] = min((best_fit_vec));
0363
0364     % now the best shift and periode was found, load the
0365     % simulated data
0366     simu = simu_orig;
0367
0368     % if there is a known offset for the Hx values it can
0369     % be corrected here by using the 'hx_offset' switch and
0370     % the 'hx_multiplier' value which can be found in the
0371     % 'prescript' section
0372
0373     % shift the simulated data by the best found shift value
0374     simu.r1_hx_sens=circshift(simu.r1_hx_sens,-shift);
0375     simu.r1_hy_sens=circshift(simu.r1_hy_sens,-shift);
0376     simu.r2_hx_sens=circshift(simu.r2_hx_sens,-shift);
0377     simu.r2_hy_sens=circshift(simu.r2_hy_sens,-shift);
0378     simu.r3_hx_sens=circshift(simu.r3_hx_sens,-shift);
0379     simu.r3_hy_sens=circshift(simu.r3_hy_sens,-shift);
0380     simu.r4_hx_sens=circshift(simu.r4_hx_sens,-shift);
0381     simu.r4_hy_sens=circshift(simu.r4_hy_sens,-shift);
0382
0383     % set the periode number which was found to p_num
0384     p_num=candidates_keeper(shift).candidates(end).fit_idx;
0385
0386     disp(['Bester shift: ' num2str(shift) ' beste Periode: '...
0387         num2str(p_num) '.'])
0388 else
0389     % if the best fitting should not be found just set a fixed
0390     % number of periode
0391     p_num = 4;
0392 end
0393
0394
0395 for kl=1:length(type_folder)-1
0396     if strcmp(type_folder(end-kl),'\') ||...
0397         strcmp(type_folder(end-kl), '/')
0398         break;
0399     end
```

```
0400 end
0401
0402 type_folder=type_folder(end-kl+1:end);
0403 if combi_plot
0404
0405     scrsz = get(0,'ScreenSize');
0406     [pathstr, name, ext] = fileparts(fusion_mat.fem_file);
0407     if x_cor==0 && y_cor==0 && phi_x_cor==0 && phi_y_cor==0 &&...
0408         phi_z_cor==0
0409         fusiontitle = [name ' with ' type_folder];
0410     else
0411         fusiontitle = [name '>>corrected:( ' num2str(y_cor)...
0412             ',0,' num2str(x_cor) ',','...
0413             num2str(phi_x_cor) ',','...
0414             num2str(phi_y_cor) ', ' num2str(phi_z_cor)...
0415             '<<' ' with ' type_folder];
0416     end
0417
0418     h(end+1)=figure('Name',fusiontitle,'units','normalized',...
0419         'outerposition',[0 0 1 1],'NumberTitle','off');
0420
0421     ksmp_field_text = ['KSMP-field data file: "' field_name '"'];
0422
0423     % subplot(2, 3, [2 5]); % middle middle plot
0424     subplot(2, 3, 2) % middle upper plot
0425     % subplot(4, 3, [2 5]) % middle upper plot
0426
0427 else
0428     h(end+1)=figure('Name',['Field diagram of AMR sensor head,'...
0429         field_name]);
0430 end
0431
0432 imagesc(hy_axis, hx_axis, hx_hy_field);
0433 % colormap(gray)
0434 axis xy;
0435 axis normal
0436 if true %~ksmp_better_res
0437     axis square
0438 end
0439
0440 h_cb=colorbar('location','EastOutside');
0441
0442 % h_cb=colorbar('location','manual');
0443 % cb_pos=get(h_cb, 'OuterPosition');
0444 % cb_pos(2)=0.18; %orig
0445 % cb_pos(2)=0.5;
0446 % set(h_cb, 'OuterPosition', cb_pos);
0447
0448 % cb_outer_position = get(h_cb, 'OuterPosition');
0449 cb_outer_position(1) = 0.6314;
0450 cb_outer_position(2) = 0.52;
0451 cb_outer_position(3) = 0.0212;
0452 cb_outer_position(4) = 0.4172;
0453
0454 set(h_cb, 'OuterPosition', cb_outer_position)
0455
0456 set(get(h_cb,'Title'),'String','voltage in mV/V');
0457 set(get(h_cb,'Title'),'Rotation',90);
0458 set(get(h_cb,'Title'),'Position',[0 0 0]);
0459
0460 title(' Field diagram of AMR sensor head ');
0461 xlabel(' H_Y in A/m');
0462 ylabel(' H_X in A/m');
```

```
0463
0464 % todo: mark start points???
0465
0466 % plot circles to field diagram
0467 %line(hy_avg, hx_avg, 'Color','r','LineWidth',2);
0468 line(simu.r1_hy_sens,simu.r1_hx_sens,'LineWidth',2,'Color','b')
0469
0470 line(simu.r2_hy_sens,simu.r2_hx_sens,'LineWidth',2,...
0471      'Color',[0 127 0]/255)
0472 line(simu.r3_hy_sens,simu.r3_hx_sens,'LineWidth',2,...
0473      'Color','r')
0474 line(simu.r4_hy_sens,simu.r4_hx_sens,'LineWidth',2,...
0475      'Color',[0 191 191]/255)
0476 legend('H_{R1}','H_{R2}','H_{R3}','H_{R4}');
0477
0478
0479 %figure;
0480 %plot(w,u_avg);
0481
0482
0483 if combi_plot
0484
0485 %     subplot(4, 3, [8 11]) % middle lower plot
0486     subplot(2, 3, 5); % middle lower plot
0487 %     subplot(2, 3, 3); % upper right plot
0488 else
0489     h(end+1)=figure('Name',['Synthesized AMR'...
0490         ' output voltage, ' field_name] );
0491 end
0492
0493 plot(w, u_r1, w, u_r2, w, u_r3, w, u_r4, 'LineWidth', 2);
0494 %     axis([0 8 -0.006 0.006]);
0495 xlabel('encoder angle in degree');
0496 ylabel('voltage in mV/V');
0497 title('Synthesized AMR output voltages across each resistor');
0498 grid on;
0499 legend(['U_{R1}','U_{R2}','U_{R3}','U_{R4}',...
0500         'Location','SouthEast']);
0501
0502 %% compare with measurement values
0503
0504
0505 if combi_plot
0506     subplot(2, 3, 3);% upper right plot
0507 %     subplot(2, 3, 6);% lower right plot
0508 % subplot(4, 3, [3 6]) % upper right plot
0509
0510 else
0511     h(end+1)=figure('Name',['Synthesized signal in comparison'...
0512         ' to measured signal']);
0513 end
0514
0515 hold on
0516 num_can = size(candidates_keeper(1).candidates,2);
0517 min_sig = candidates_keeper(1).candidates(1).per_small;
0518 max_sig = min_sig;
0519 p_len=length(max_sig);
0520 w_u_diff=linspace(0, max_winkel, p_len);
0521
0522 if plot_channel
0523     % plots for the legend..
0524 %
```



```
0526
0527 if plot_shift_measurement
0528     candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small =...
0529
0530 circshift(candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small,32);
0531 end
0532 ph_1 = plot(w_u_diff,...
0533             candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small,...
0534             'LineWidth', 2);
0535 %
0536 plot(w, u_b*-1.0+0.0000, 'r+', 'LineWidth', 2);
0537
0538 for i=1:num_can
0539     % always without shifting -> (1)
0540     act_per = candidates_keeper(1).candidates(i).per_small;
0541     if act_per(1) < act_per(4)
0542         continue
0543     end
0544
0545     plot(w_u_diff, act_per, 'Color',...
0546          [0.75 0.75 0.75], 'LineWidth',5)
0547
0548     off_per = (max(act_per)+min(act_per))/2;
0549
0550     hold on
0551     for j=1:length(act_per)
0552         if act_per(j) < off_per                % below offset
0553             if act_per(j) < max_sig(j)
0554                 max_sig(j) = act_per(j);
0555             end
0556             if act_per(j) >= min_sig(j)
0557                 min_sig(j) = act_per(j);
0558             end
0559         else                                    % above offset
0560             if act_per(j) > max_sig(j)
0561                 max_sig(j) = act_per(j);
0562             end
0563             if act_per(j) <= min_sig(j)
0564                 min_sig(j) = act_per(j);
0565             end
0566         end
0567     end
0568 end
0569
0570 for i=1:length(act_per)
0571     if abs(max_sig(i)) < abs(min_sig(i))
0572         temp_sig = max_sig(i);
0573         max_sig(i) = min_sig(i);
0574         min_sig(i) = temp_sig;
0575     end
0576 end
0577
0578 area(w_u_diff, max_sig, 'FaceColor', [0.75 0.75 0.75])% gray
0579 area(w_u_diff, min_sig, 'FaceColor', [1 1 1])    % white
0580
0581 end
0582
0583 ph_2 = plot(w_u_diff,...
0584             candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small,...
0585             'LineWidth',
0586             2);
```

```
0587 achse = axis;
0588 if plot_same_axis
0589     axis([achse(1) achse(2) -0.015 0.015])
0590 end
0591 plot(w_u_diff, u_b*-1.0+0.0000, 'r+', 'LineWidth', 2);
0592
0593 if ~plot_measurement
0594     delete(ph_1)
0595     delete(ph_2)
0596 end
0597
0598 set(gca, 'Layer', 'top')
0599 grid on;
0600 legend('measured signal', 'synthesized signal', 'Location', ...
0601         'SouthEast');
0602 title('Synthesized signal in comparison to measured signal');
0603 xlabel('encoder angle in degree');
0604 ylabel('voltage in mV/V');
0605
0606 % plot the values to the diagram
0607 axishight = axis;
0608 if plot_text
0609     text(.5, axishight(4)/5*4, ...
0610         ['HDi(sim): ' num2str(u_b_hdi*100, '% 1.2f') '%'], ...
0611         'BackgroundColor', [1 .4157 .4157]);
0612     text(.5, axishight(4)/5*3, ['HD5(sim): ' ...
0613         num2str(u_b_hd5*100, '% 1.2f') '%'], ...
0614         'BackgroundColor', [1 .4157 .4157]);
0615     text(.5, axishight(4)/5*2, ['HDi(scope): ' ...
0616 num2str(candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small_HDi*100,
0617         '% 1.2f') '%'], 'BackgroundColor', [.3608 .6745 .933]);
0618     text(.5, axishight(4)/5, ['HD5(scope): ' ...
0619 num2str(candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small_HDi*100,
0620         '% 1.2f') '%'], 'BackgroundColor', [.3608 .6745 .933]);
0621 end
0622 hold off
0623 %% plot fft's
0624 m_per = candidates_keeper(1).candidates(p_num).per_small;
0625
0626 % save_fig_handle =(gcf);
0627 cv=xcorr(-u_b,m_per);
0628 max(cv);
0629 % figure, plot(cv)
0630 % figure(save_fig_handle)
0631
0632 %%
0633 dat = ones(6,7);
0634 hax = axes('Position', [0.6916 0.330 0.2134 0.12]);
0635 title('FFT of the synthesized and the measured signal')
0636
0637 %%
0638 if combi_plot
0639     % subplot(2, 3, 6)
0640
0641 else
0642     % todo: create an extra figure
0643 end
0644
0645 fft_axis_divider=8;
0646
0647 u_b_fft = fft(u_b*-1.0);
```

```

0648 u_b_angle = angle(u_b_fft).*360./(2*pi);
0649 u_b_fft = abs(u_b_fft).*2./length(u_b_fft);
0650 x_axis_max = length(u_b_fft)/fft_axis_divider - 1;
0651
0652 angle_threshold = 1;
0653 u_b_fft_idx = find(u_b_fft>=(max(u_b_fft)/100*angle_threshold));
0654 u_b_angle_tmp = zeros(length(u_b_angle),1);
0655 u_b_angle_tmp(u_b_fft_idx) = u_b_angle(u_b_fft_idx);
0656 u_b_angle = u_b_angle_tmp;
0657
0658
0659 signal_similarity = corrcoef(u_b, m_per);
0660 signal_similarity = abs(signal_similarity(1,2))*100;
0661 % rounding to have only two decimal places
0662 signal_similarity = round(signal_similarity*100)/100;
0663
0664 if signal_similarity > 90
0665     text_background_color = [0 1 .5];
0666 else
0667     text_background_color = [240 128 128]./255;
0668 end
0669
0670
0671 hold on
0672
0673 m_per_fft = fft(m_per);
0674 m_per_angle = angle(m_per_fft).*360./(2*pi);
0675 m_per_fft = abs(m_per_fft).*2./length(m_per_fft);
0676 x_axis_max = length(m_per_fft)/fft_axis_divider - 1;
0677 stem(hax,0:x_axis_max,(m_per_fft(1:end/fft_axis_divider)))
0678 hold on
0679 stem(hax,0:x_axis_max,(u_b_fft(1:end/fft_axis_divider)),'r+')
0680 axis(hax,[0 x_axis_max+1 0 15 ]) % axis maximum is fixed!
0681 xlabel(hax,'F_s/N')
0682 ylabel(hax,'Amplitude')
0683 grid on
0684 % title('FFT comparison of the measured and simulated signal')
0685 legend(hax,'FFT(measured signal)', ...
0686         'FFT(synthesized signal)', ...
0687         'Location', 'NorthEast');
0688 m_per_fft_idx = find(m_per_fft>=...
0689                     (max(m_per_fft)/100*angle_threshold));
0690 m_per_angle_tmp = zeros(length(m_per_angle),1);
0691 m_per_angle_tmp(m_per_fft_idx) = m_per_angle(m_per_fft_idx);
0692 m_per_angle = m_per_angle_tmp;
0693
0694 for bb=1:x_axis_max
0695     if (u_b_fft(bb+1)*2+0.1) > m_per_fft(bb+1)*2+0.1
0696         text_hight = u_b_fft(bb+1)*2+0.05;
0697     else
0698         text_hight = m_per_fft(bb+1)*2+0.05;
0699     end
0700 end
0701 hold off
0702
0703 dat(1,:) = round(u_b_angle(2:size(dat,2)+1));
0704 dat(2,:) = round(m_per_angle(2:size(dat,2)+1));
0705 dat(3,:) = abs(dat(1,)-dat(2,));
0706 dat(4,:) = u_b_fft(2:size(dat,2)+1)*2;
0707 dat(5,:) = m_per_fft(2:size(dat,2)+1)*2;
0708 dat(6,:) = abs(dat(4,)-dat(5,));
0709
0710 for zz=1:size(dat,1)

```

```
0711     for ss=1:size(dat,2)
0712         if dat(zz,ss) < 1e-3
0713             dat(zz,ss) = round(dat(zz,ss)*1000)/1000;
0714         end
0715     end
0716 end
0717
0718 create_vector_table(h,dat)
0719 if combi_plot
0720     % subplot(4, 3,[1 4]) % upper left plot
0721     subplot(2, 3, 1); % upper left plot
0722 else
0723     h(end+1)=figure('Name',...
0724         'simulated field strength on AMR sensor');
0725     subplot(1, 2, 1);
0726 end
0727
0728 plot(simu.w, simu.r1_hy_sens, ...
0729     simu.w, simu.r2_hy_sens, ...
0730     simu.w, simu.r3_hy_sens, ...
0731     simu.w, simu.r4_hy_sens, 'LineWidth', 2);
0732
0733 legend('Hy_{R1}', ...
0734     'Hy_{R2}', ...
0735     'Hy_{R3}', ...
0736     'Hy_{R4}', ...
0737     'Location', 'NorthEast');
0738
0739 xlabel('encoder angle in degree');
0740 ylabel('field strength in A/m');
0741 title('H_Y field strengths');
0742 %axis([0 8 -8000 8000]);
0743 grid on;
0744
0745 if combi_plot
0746     % subplot(4, 3, [7 10]) % lower left plot
0747     subplot(2, 3, 4); % lower left plot
0748 else
0749     subplot(1,2,2);
0750 end
0751
0752 plot(simu.w, simu.r1_hx_sens, ...
0753     simu.w, simu.r2_hx_sens, ...
0754     simu.w, simu.r3_hx_sens, ...
0755     simu.w, simu.r4_hx_sens, 'LineWidth', 2);
0756
0757 legend('Hx_{R1}', ...
0758     'Hx_{R2}', ...
0759     'Hx_{R3}', ...
0760     'Hx_{R4}', ...
0761     'Location', 'SouthEast');
0762
0763 xlabel('encoder angle in degree');
0764 ylabel('field strength in A/m');
0765 title('H_X field strengths');
0766 %axis([0 8 -5000 -2000]);
0767 grid on;
0768
0769 if combi_plot==false
0770     suplabel('mean field strength on the AMR resistors', 't');
0771 end
0772
0773 % loop end
```

```

0774 % figure, stem(abs(fft(u_b)))
0775 save_fig='No';
0776 if save_figures
0777     save_fig = save_question_gui();
0778 end
0779
0780
0781 % options = {'-depsc2'};
0782 % old_mode = get(h, 'PaperPositionMode');
0783 % set(h, 'PaperPositionMode', 'auto');
0784 % % Print to eps file
0785 % print(h, options{:});
0786 % % Reset paper size
0787 % set(h, 'PaperPositionMode', old_mode);
0788
0789 sh = suplabel(strrep([fusiontitle ' ' ksmp_field_text]...
0790                     , '_','\'_') , 't');
0791
0792
0793 if strcmp('Yes', save_fig)
0794
0795     if ispc
0796         [pathstr, name, ext] = fileparts(fusion_mat.fem_file);
0797
0798         for find_name_annex=length(name):-1:1
0799             if strcmp(name(find_name_annex), '_')
0800                 break;
0801             end
0802         end
0803         if find_name_annex > 20
0804             name_annex = name(find_name_annex+1:end);
0805         else
0806             name_annex = '';
0807         end
0808         for find_underline = 1:length(name)
0809             if strcmp(name(find_underline), '_')
0810                 break;
0811             end
0812         end
0813         enc_type = name(1:find_underline-1);
0814         enc_type = [enc_type name_annex];
0815
0816         name = [enc_type '_' (' num2str(y) ',0,' num2str(x) ',','...
0817                 num2str(phi_x) ',',' num2str(phi_y)...
0818                 ',',' num2str(phi_z) ')'];
0819
0820         % if there was a correction of the dataset change
0821         % the filename
0822         if x_cor~=0 || y_cor~=0 || phi_x_cor~=0 ||...
0823             phi_y_cor~=0 || phi_z_cor~=0
0824             name = [enc_type '_' (' num2str(y-y_cor) ',0,'...
0825                     num2str(x-x_cor) ...
0826                     ',',' num2str(phi_x-phi_x_cor)...
0827                     ',',' num2str(phi_y-phi_y_cor)...
0828                     ',',' num2str(phi_z-phi_z_cor) ')'];
0829
0830             name = [name '_corrected_' (' num2str(y_cor) ',0,'...
0831                     num2str(x_cor) ',',' num2str(phi_x_cor) ',','...
0832                     num2str(phi_y_cor) ',',' num2str(phi_z_cor) ')'];
0833         end
0834
0835         for i=1: numel(h)
0836             if numel(h)~=1

```

```
0837         png_filename = [folder2savefigs...
0838         'field_diagram_fem_rmp_fusion_'...
0839         num2str(i) '_' name name_extension '_with_'...
0840         type_folder '.png'];
0841         pdf_filename = [folder2savefigs...
0842         'field_diagram_fem_rmp_fusion_'...
0843         num2str(i) '_' name name_extension '_with_'...
0844         type_folder '.pdf'];
0845
0846
0847     else
0848         png_filename = [folder2savefigs...
0849         'field_diagram_fem_rmp_fusion_'...
0850         name name_extension '_with_'...
0851         type_folder '.png'];
0852         pdf_filename = [folder2savefigs...
0853         'field_diagram_fem_rmp_fusion_'...
0854         name name_extension '_with_'...
0855         type_folder '.pdf'];
0856         eps_filename = [folder2savefigs...
0857         'field_diagram_fem_rmp_fusion_'...
0858         name name_extension '_with_'...
0859         type_folder '.eps'];
0860     end
0861
0862     export_fig(h(i), png_filename, 'A3LP');
0863     export_fig(h(i), pdf_filename, 'A3L');
0864     print(h(i), '-dpsc2', eps_filename);
0865
0866     %         export_fig(h(i), eps_filename, 'A3L');
0867
0868
0869     %     close(i);
0870     end
0871     else
0872         error('change the pathnames to LINUX - style!')
0873     end
0874
0875     %     delete(sh);
0876 end
0877
0878
0879 end
0880
0881 %%
0882 function out = interpolate_fields(simu, faktor)
0883 if length(simu.r1_hx_sens) > 8
0884     simu.r1_hx_sens = interp(simu.r1_hx_sens, faktor);
0885     simu.r2_hx_sens = interp(simu.r2_hx_sens, faktor);
0886     simu.r3_hx_sens = interp(simu.r3_hx_sens, faktor);
0887     simu.r4_hx_sens = interp(simu.r4_hx_sens, faktor);
0888
0889     simu.r1_hy_sens = interp(simu.r1_hy_sens, faktor);
0890     simu.r2_hy_sens = interp(simu.r2_hy_sens, faktor);
0891     simu.r3_hy_sens = interp(simu.r3_hy_sens, faktor);
0892     simu.r4_hy_sens = interp(simu.r4_hy_sens, faktor);
0893
0894     simu.w = interp(simu.w, faktor);
0895 else
0896     simu.r1_hx_sens = interp(simu.r1_hx_sens, faktor, 3, 0.5);
0897     simu.r2_hx_sens = interp(simu.r2_hx_sens, faktor, 3, 0.5);
0898     simu.r3_hx_sens = interp(simu.r3_hx_sens, faktor, 3, 0.5);
0899     simu.r4_hx_sens = interp(simu.r4_hx_sens, faktor, 3, 0.5);
```

```
0900
0901     simu.r1_hy_sens = interp(simu.r1_hy_sens, faktor, 3, 0.5);
0902     simu.r2_hy_sens = interp(simu.r2_hy_sens, faktor, 3, 0.5);
0903     simu.r3_hy_sens = interp(simu.r3_hy_sens, faktor, 3, 0.5);
0904     simu.r4_hy_sens = interp(simu.r4_hy_sens, faktor, 3, 0.5);
0905
0906     simu.w = interp(simu.w, faktor, 3, 0.5);
0907 end
0908 out = simu;
0909 end
0910
0911 function [ksmp_field_dirname folder2savefigs]=...
0912         get_ksmp_field_folder_name(ksmp_better_res)
0913 if ispc
0914     % directory to search for ksmp fields
0915     if ksmp_better_res
0916         % newest ksmp fields zipfel
0917         ksmp_field_dirname =...
0918         'X:\ksmp2_measurements\analysed\speed_sens_with_magnet';
0919     else
0920         % new ksmp fields zipfel
0921         ksmp_field_dirname =...
0922         'X:/ksmp2_measurements/analysed/speed_sens';
0923         % old fields
0924         %         ksmp_field_dirname = 'X:/ksmp1_measurements';
0925     end
0926     % foldername to store the result figure(s) in
0927     if ~ksmp_better_res
0928         folder2savefigs = ['C:\workspace\ksmp\measurements\'...
0929                             'field_diagram_fem_rmp_fusion\results\'...
0930                             'gui_results\normal_ksmp_field\'];
0931     else
0932         folder2savefigs = [...
0933                             'C:\workspace\ksmp\measurements\'...
0934                             'field_diagram_fem_rmp_fusion\results\'...
0935                             'gui_results\better_resolution_ksmp_field\'];
0936     end
0937 else
0938     error('change the pathnames to LINUX - style!')
0939 end
0940 end
0941
0942 %%
0943 function [u_diff, u_diff_zc_falling_idx]=...
0944         load_rmp_dataset(fusion_mat,type_folder)
0945 % filter out the foldername where the measurementresults
0946 % are stored in, just for the plot
0947 rmp_measurement_dir_small = type_folder;
0948 for kl=1:length(rmp_measurement_dir_small)-1
0949     if strcmp(rmp_measurement_dir_small(end-kl),'\') || ...
0950         strcmp(rmp_measurement_dir_small(end-kl), '/')
0951         break;
0952     end
0953 end
0954 rmp_measurement_dir_small=...
0955     rmp_measurement_dir_small(end-kl+1:end);
0956 % test whether the same data was searched before
0957 pre_searched_file=false; % default
0958 % set the foldername where datasets of previous searched
0959 % simulations can be found, this enhances the speed!
0960 if ispc
0961     prefiledir = 'X:/rmp3_measurement_presearched';
0962 else
```

```
0963     error('change the pathnames to LINUX - style!')
0964 end
0965 prefilename = [rmp_measurement_dir_small '_'('...
0966     num2str(fusion_mat.x) ',' ...
0967     num2str(fusion_mat.y) ',' num2str(fusion_mat.phi_x) ',' ...
0968     num2str(fusion_mat.phi_y) ',' num2str(fusion_mat.phi_z)...
0969     ').mat'];
0970
0971 list_of_files = what(prefiledir);
0972
0973 for sf=1:length(list_of_files.mat)
0974     if strcmp(list_of_files.mat(sf), prefilename)
0975         pre_searched_file = true;
0976     end
0977 end
0978 % load rmp measurement data
0979
0980 demo=struct();
0981 if ~pre_searched_file
0982     try
0983         % search inside the 'rmp_measurement_dir' for
0984         % the dataset of the simulation setup and load the
0985         % new data
0986         temp = get_scope_data(...
0987             'x', fusion_mat.y,... % todo add the x_shift
0988             'y', 0.0,...
0989             'z', -fusion_mat.x,...
0990             'phi_x', fusion_mat.phi_x,...
0991             'phi_y', fusion_mat.phi_y,...
0992             'phi_z', fusion_mat.phi_z,...
0993             'demo',true,...
0994             'scope',true,...
0995             'dirname', type_folder);
0996
0997         scope = temp.scope;
0998         demo = temp.demo;
0999
1000         % save the dataset for the current simulation setup
1001         % in the folder containing the previous searched setups
1002         save(fullfile(prefiledir, prefilename), 'scope', ...
1003             'demo', 'fusion_mat');
1004     catch
1005         % If dataset was not found in the specified folder
1006         disp('Dataset was not found in the specified folder')
1007         error(['Dataset not existing'...
1008             '...choose another measurement directory...']);
1009     end
1010 else
1011     load(fullfile(prefiledir, prefilename));
1012 end
1013 % calculate the measured bridge voltage
1014 gain=25*2^(demo.gain-1);
1015 %u_diff=(scope.u_diff-mean(scope.u_diff))./gain;
1016 %     u_diff=(scope.u_diff-1.25)./gain; % orig
1017 u_diff=(scope.u_hb2-scope.u_hb1)./gain;
1018 u_bridge=3.0;
1019 u_diff=u_diff./u_bridge.*1000;
1020 % offset deletion
1021 u_diff = u_diff - mean(u_diff);
1022
1023 % find zero crossing and estimate edge
1024 % [u_diff_zc_raising_idx u_diff_zc_falling_idx]=...
1025 %     zero_cross(u_diff,'gap2nxtper',7000,'x_span', 0.001);
```



```
1026     [cro_gap u_diff_zc_raising_idx u_diff_zc_falling_idx] =...
1027                                     get_zero_crossings(u_diff);
1028
1029     % if a distance above 4mm was simulated apply a filter to
1030     % the measurement data
1031     if fusion_mat.x>4
1032         % tp
1033         load('filter_coeffs_tp.mat');
1034         u_diff_filtered=filter(b_tp,1,u_diff);
1035         figure,plot(u_diff_filtered)
1036         load('filter_coeffs.mat');
1037         u_diff_filtered=filter(b_hp,1,u_diff_filtered);
1038         figure,plot(u_diff_filtered)
1039     end
1040     % add the offset to the scope signal
1041     % u_offset = (demo.offset/4095-1.25)/25;
1042     % u_diff = u_diff - u_offset;
1043     end
1044
1045     %%
1046     function [hy_axis, hx_axis, hx_hy_field, field_name] =...
1047         load_ksmp_field_diagram(search_best_field,...
1048                                 fusion_mat,...
1049                                 ksmp_better_res,...
1050                                 rotate_field,...
1051                                 rot_angle,...
1052                                 ksmp_field_name,...
1053                                 hx_multiplier,...
1054                                 hy_multiplier,...
1055                                 ksmp_field_dirname,...
1056                                 ksmp_field_user,...
1057                                 load_from_matlab_db,...
1058                                 simu)
1059     if search_best_field
1060
1061         if ~load_from_matlab_db
1062             % load the simulated data and get the maximum value
1063             % of the H-field
1064             simu=cst_import_sim_data(fusion_mat.fem_file);
1065         end
1066
1067         if length(simu.w) < 32
1068             simu = interpolate_fields(simu, 4);
1069         end
1070         max_feld=0;
1071
1072         if ~ksmp_better_res
1073             for j=1:2
1074                 if j==1
1075                     xy='x';
1076                 else
1077                     xy='y';
1078                 end
1079                 for i=1:4
1080                     eval(['r=simu.r' num2str(i) '_h' xy '_sens;'])
1081                     if j==1
1082                         r=max(abs(r))*hx_multiplier;
1083                     else
1084                         r=max(abs(r))*hy_multiplier;
1085                     end
1086                     if r > max_feld
1087                         max_feld=r;
1088                     end
1089                 end
1090             end
1091         end
1092     end
1093 end
```

```

1089         end
1090     end
1091     max_feld=max_feld+2000;
1092 else
1093     [val B]=fileparts(fusion_mat.fem_file);
1094
1095     if strcmp(B(1:5),'Golf5')
1096         ksmp_field_dirname =...
1097         ['X:\ksmp2_measurements\'...
1098         'ksmp_field_with_magnet_active_encoder'];
1099     else
1100         ksmp_field_dirname =...
1101         ['X:\ksmp2_measurements\'...
1102         'ksmp_field_with_magnet_passive_encoder'];
1103     end
1104     all_fields = [simu.r1_hx_sens; simu.r2_hx_sens ;...
1105                 simu.r3_hx_sens; simu.r4_hx_sens];
1106     all_fields = [all_fields; simu.r1_hy_sens;...
1107                 simu.r2_hy_sens; simu.r3_hy_sens;...
1108                 simu.r4_hy_sens];
1109     all_fields = abs(all_fields);
1110     max_feld = max(all_fields) * hy_multiplier;
1111
1112     max_feld=max_feld+300;
1113 end
1114
1115 [hy_axis hx_axis  hx_hy_field field_name] =...
1116     choose_ksmp_field_diagram(max_feld, ksmp_field_dirname);
1117 else
1118     field_name = 'prechoosen ksmp field in use';
1119     % otherwise load a fixed ksmp_field
1120     if ispc
1121         [hy_axis hx_axis  hx_hy_field] =...
1122         field_diagram_statistical_method(['X:/\'...
1123         'ksmp1_measurements/2009_09_29_'...
1124         'stark-feld_01.ksmp.mat']);
1125     if ksmp_field_user
1126         [ksmp_path, ksmp_filename ,ksmp_file_extension] =...
1127         fileparts(ksmp_field_name);
1128         if strcmp(ksmp_filename(end-9:end), 'better_res')
1129             load(ksmp_field_name, 'hy_hx_avg',...
1130                 'hx_axis', 'hy_axis');
1131             hx_hy_field = hy_hx_avg;
1132             clear hy_hx_avg ksmp_path ksmp_file_extension
1133         else
1134             [hy_axis hx_axis hx_hy_field] =...
1135
1136     field_diagram_statistical_method_ksmp2_load_analysed(ksmp_field_name);
1137     end
1138     else
1139         error('no error')
1140     end
1141 else
1142     error('change the pathnames to LINUX - style!')
1143 end
1144
1145 % if there is a known rotation error in the selected ksmp
1146 % field it can be corrected by using the 'rotate_field'
1147 % switch and an rotation angle 'rot_angle' which has to be
1148 % chosen in the 'prescript' section
1149 end
1150 if rotate_field
1151     hx_hy_field=imrotate(hx_hy_field,rot_angle);

```

```
1151 end
1152 % delete the offset of the ksmpl field
1153 m_hx_hy_field = mean(mean(hx_hy_field));
1154 hx_hy_field = hx_hy_field - m_hx_hy_field;
1155 end
1156
1157 function out = change_rotational_direction(simu)
1158
1159 simu.r1_hx_sens = flipdim(simu.r1_hx_sens,1);
1160 simu.r2_hx_sens = flipdim(simu.r2_hx_sens,1);
1161 simu.r3_hx_sens = flipdim(simu.r3_hx_sens,1);
1162 simu.r4_hx_sens = flipdim(simu.r4_hx_sens,1);
1163 simu.r1_hy_sens = flipdim(simu.r1_hy_sens,1);
1164 simu.r2_hy_sens = flipdim(simu.r2_hy_sens,1);
1165 simu.r3_hy_sens = flipdim(simu.r3_hy_sens,1);
1166 simu.r4_hy_sens = flipdim(simu.r4_hy_sens,1);
1167 out = simu;
1168 end
1169
1170 function create_vector_table(fig_handle,data)
1171 %%
1172 rownames = {'1st' '2nd' '3rd' '4th' '5th' '6th' '7th'};
1173 colnames = {'meas. angle [°]' 'sim. angle [°]'}...
1174           'diff. angle [°]' 'meas. ampl.'...
1175           'sim. ampl.' 'diff. ampl.'};
1176 figure(fig_handle)
1177 axes('Position', [0.6916 0.1100 0.2134 0.145]);
1178 axis([0 18 2 9])
1179 title('Harmonics comparison')
1180 axis off
1181
1182 number_of_cols = size(colnames,2); % 6
1183 number_of_rows = size(rownames,2); % 7
1184 number_horizontallines = number_of_cols+1; % 7
1185 number_verticallines = number_of_rows+1; % 8
1186 cell_width = 2;
1187 cell_hight = 1;
1188 text_color = [0 0 0];
1189 line_color = [0 0 0];
1190
1191 % add highlight stripes to be able to easily read the table
1192 highlightcolor = [0.95 0.95 0.95];
1193 line([0 18],[2.5 2.5],'Color',highlightcolor,'LineWidth', 17)
1194 line([0 18],[4.5 4.5],'Color',highlightcolor,'LineWidth', 17)
1195 line([0 18],[6.5 6.5],'Color',highlightcolor,'LineWidth', 17)
1196 line([4 18],[8.5 8.5],'Color',highlightcolor,'LineWidth', 17)
1197
1198 % create the horizontallines except the one on the top
1199 for i=1:number_horizontallines % horizontale linien
1200     line([0 cell_width*number_verticallines+cell_width],...
1201         [i+cell_hight i+cell_hight],'Color',line_color)
1202 end
1203 % create the line on top
1204 line([cell_width*2
cell_width*number_verticallines+cell_width],...
1205     [i+cell_hight*2 i+cell_hight*2],'Color',line_color)
1206
1207 % create the vertical lines except the first
1208 for i=1:number_verticallines
1209     line([cell_width+i*cell_width cell_width+i*cell_width],...
1210         [2 number_verticallines+1],'Color',line_color)
1211 end
1212 % create the first vertical line
```

```

1213 line([0 0],[cell_width number_vertical_lines],'Color',line_color)
1214
1215 % name the rows
1216 for i=1:number_of_rows
1217     text(cell_width+cell_width*0.25+i*cell_width,...
1218         number_vertical_lines+0.5, rownames{i},...
1219         'FontSize', 7,'FontWeight', 'bold', 'Color', text_color)
1220 end
1221
1222 % name the cols
1223 for i=1:number_of_cols
1224     text(0.07, number_vertical_lines+0.5-i, colnames{i},...
1225         'FontSize', 7,'FontWeight', 'bold', 'Color', text_color)
1226 end
1227
1228 % write the values to the table
1229 for i=1:size(data,2)
1230     text(cell_width+cell_width*0.125+i*cell_width,...
1231         number_vertical_lines+0.5-1, num2str(data(1,i),...
1232         '%3.0f'),'FontSize', 8, 'Color', [0 0 1])
1233     text(cell_width+cell_width*0.125+i*cell_width,...
1234         number_vertical_lines+0.5-2, num2str(data(2,i),...
1235         '%3.0f'),'FontSize', 8, 'Color', [1 0 0])
1236     text(cell_width+cell_width*0.125+i*cell_width,...
1237         number_vertical_lines+0.5-3, num2str(data(3,i),...
1238         '%3.0f'),'FontSize', 8, 'Color', text_color)
1239     text(cell_width+cell_width*0.125+i*cell_width,...
1240         number_vertical_lines+0.5-4, num2str(data(4,i),...
1241         '%3.2f'),'FontSize', 8, 'Color', [0 0 1])
1242     text(cell_width+cell_width*0.125+i*cell_width,...
1243         number_vertical_lines+0.5-5, num2str(data(5,i),...
1244         '%3.2f'),'FontSize', 8, 'Color', [1 0 0])
1245     text(cell_width+cell_width*0.125+i*cell_width,...
1246         number_vertical_lines+0.5-6, num2str(data(6,i),...
1247         '%3.2f'),'FontSize', 8, 'Color', text_color)
1248 end
1249 end

```

## B.2 VBA-Code

Macro zum erstellen einfacher Encoderstrukturen für aktive Encoder.

```

001 ' Create Magnetic Encoder
002 ' v0.1
003
004 'Option Explicit
005 Sub Main
006
007 ' define in dlg used variables
008
009 Dim scomp_name As String
010 Dim sname_mag As String
011 Dim num_mags As Integer
012 Dim num_parts As Double
013 Dim radius As Double
014 Dim mag_width As Double
015 Dim mag_height As Double
016 Dim mag_depth As Double
017 Dim x_mag_anz As Integer

```

```
018
019 ' define used variables
020
021 Dim old_name As String
022 Dim new_name As String
023 Dim mag_ctr As Integer
024 Dim order As String
025 Dim numlst_mag As Integer
026
027 ' loop variables
028 Dim i As Integer
029 Dim k As Integer
030 Dim m As Integer
031
032 ' name parameters
033 Dim magnet_name As String
034 Dim x As String
035 Dim y As String
036 Dim z As String
037
038 Dim cst_result As Integer
039
040 BeginHide
041 Begin Dialog UserDialog 400,406, "Create encoder rectangle pole's" '
%GRID:10,7,1,1
042     GroupBox 30,14,340,209,"Encoder Parameter",.GroupBox1
043     Text 60,45,160,14,"Component Name",.Text1
044     Text 60,75,160,14,"Number of Magnets",.Text2
045     Text 60,105,160,14,"Number of parts",.Text3
046     Text 60,135,160,14,"Radius of the encoder",.Text4
047     Text 60,165,160,14,"Number first Magnet",.Text5
048     Text 60,195,160,14,"Number of Parts x",.Text9
049     GroupBox 30,224,340,126,"Magnet Parameter",.GroupBox2
050     Text 60,255,160,14,"Width of one pole",.Text6
051     Text 60,285,160,14,"Height of one pole",.Text7
052     Text 60,315,160,14,"Depth (z range)",.Text8
053     OKButton 70,371,90,21
054     CancelButton 240,371,90,21
055     TextBox 240,45,90,21,.scomp_name
056     TextBox 240,75,90,21,.num_mags
057     TextBox 240,105,90,21,.num_parts
058     TextBox 240,133,90,21,.radius
059     TextBox 240,165,90,21,.sname_mag
060     TextBox 240,195,90,21,.x_mag_anz
061     TextBox 240,255,90,21,.mag_width
062     TextBox 240,285,90,21,.mag_height
063     TextBox 240,315,90,21,.mag_depth
064 End Dialog
065 Dim dlg As UserDialog
066
067 ' dialoge defaults
068
069     dlg.scomp_name = "Encoder"
070     dlg.num_mags = "43"
071     dlg.num_parts = "43"
072     dlg.sname_mag = "0"
073     dlg.radius = "35"
074     dlg.mag_width = "2"
075     dlg.mag_height = "5"
076     dlg.mag_depth = "1"
077     dlg.x_mag_anz = "1"
078
079     'Dialog dlg
080
081     'If cancel is pressed
082     cst_result = Dialog(dlg)
083     assign "cst_result"
084     If (cst_result = 0) Then Exit All
085
086     'copy dlg variables to local variables
```

```
087 scomp_name = dlg.scomp_name
088 num_mags = evaluate(dlg.num_mags)
089 num_parts = evaluate(dlg.num_parts)
090 numlst_mag = evaluate(dlg.sname_mag)
091 sname_mag = "m" & numlst_mag & "_p"
092 radius = evaluate(dlg.radius)
093 mag_width = evaluate(dlg.mag_width)
094 mag_height = evaluate(dlg.mag_height)
095 mag_depth = evaluate(dlg.mag_depth)
096 x_mag_anz = evaluate(dlg.x_mag_anz)
097
098 assign "scomp_name"
099 assign "num_mags"
100 assign "num_parts"
101 assign "sname_mag"
102 assign "radius"
103 assign "mag_width"
104 assign "mag_height"
105 assign "mag_depth"
106 assign "x_mag_anz"
107
108 EndHide
109 ans = MsgBox( "Please keep in mind that there is no error handling
implemented...",vbOkCancel ,"Important information!")
110 If ans <> 1 Then Exit All
111
112 ' setting up a new WCS and store it
113 WCS.ActivateWCS "global"
114 WCS.ActivateWCS "local"
115 With WCS
116     .SetNormal "0", "0", "1"
117     .SetOrigin radius, "0", "0"
118     .SetUVector "1", "0", "0"
119 End With
120
121 WCS.Store "encoder_center"
122
123 ' creating the first brick(s)
124 WCS.ActivateWCS "global"
125 For i=0 To x_mag_anz-1
126     With Brick
127         .Reset
128         .Name sname_mag & i
129         .Component scomp_name
130         .Material "Vacuum"
131         .Xrange                -(mag_height/2)+(mag_height/x_mag_anz)*i,-
(mag_height/2)+(mag_height/x_mag_anz)*(i+1)
132         .Yrange -(mag_width/2), (mag_width/2)
133         .Zrange -mag_depth-0.5, "-0.5"
134         .Create
135     End With
136 Next i
137
138
139 ' creating the magnet parts by rotating the brick
140
141 WCS.Restore "encoder_center"
142
143 ' create copies of the first brick and rotate them
144
145 With Transform
146     .Reset
147     .Name scomp_name
148     .Origin "Free"
149     .Center "0", "0", "0"
150     .Angle "0", "0", -(180/num_mags)
151     .MultipleObjects "True"
152     .GroupObjects "False"
153     .Repetitions num_parts*2-1
154     .MultipleSelection "False"
```

```
155     .Destination ""
156     .Material ""
157     .Transform "Shape", "Rotate"
158 End With
159
160 ' rename the copies
161 For k=0 To x_mag_anz-1
162     mag_ctr = num1st_mag
163     For i=1 To 2*num_parts-1
164         old_name = sname_mag & k & "_" & i
165         If (i Mod 2) <> 0 Then
166             new_name = "m" & mag_ctr & "_n" & k
167             mag_ctr = mag_ctr + 1
168         Else
169             new_name = "m" & mag_ctr & "_p" & k
170         End If
171         order = scomp_name & ":" & old_name
172         Solid.Rename order, new_name
173     Next i
174 Next k
175
176 For i=num1st_mag To num_parts+num1st_mag-1
177     For k=1 To 2
178         For m=0 To x_mag_anz-1
179
180             If k <= 1 Then
181                 magnet_name = "m" & i & "_p" & m
182                 x = "x_pos"
183                 y = "y_pos"
184                 z = "z_pos"
185             Else
186                 magnet_name = "m" & i & "_n" & m
187                 x = "x_neg"
188                 y = "y_neg"
189                 z = "z_neg"
190             End If
191
192             order = scomp_name & ":" & magnet_name
193             With Magnet
194                 .Reset
195                 .Name magnet_name
196                 .SetMagnetType "Constant"
197                 .XMagVector x
198                 .YMagVector y
199                 .ZMagVector z
200                 .Face order, "1"
201                 .Transformable "True"
202                 .Create
203             End With
204         Next m
205     ' Rotate the WCS
206     WCS.RotateWCS "w", -(180/num_mags)
207 Next k
208 Next i
209
210 WCS.Restore "encoder_center"
211
212 ' include the distance variable
213 With Transform
214     .Reset
215     .Name scomp_name
216     .Vector "0", "0", "-dist"
217     .UsePickedPoints "False"
218     .InvertPickedPoints "False"
219     .MultipleObjects "False"
220     .GroupObjects "False"
221     .Repetitions "1"
222     .MultipleSelection "False"
223     .Transform "Shape", "Translate"
224 End With
```

```
225
226 'rotate the parts to be in the middle
227
228 If num_mags <> num_parts Then
229     With Transform
230         .Reset
231         .Name scomp_name
232         .Origin "Free"
233         .Center "0", "0", "0"
234         .Angle "0", "0", (180/43)*(num_parts-2)
235         .MultipleObjects "False"
236         .GroupObjects "False"
237         .Repetitions "1"
238         .MultipleSelection "False"
239         .Transform "Shape", "Rotate"
240     End With
241 End If
242
243 WCS.ActivateWCS "global"
244
245 End Sub
```



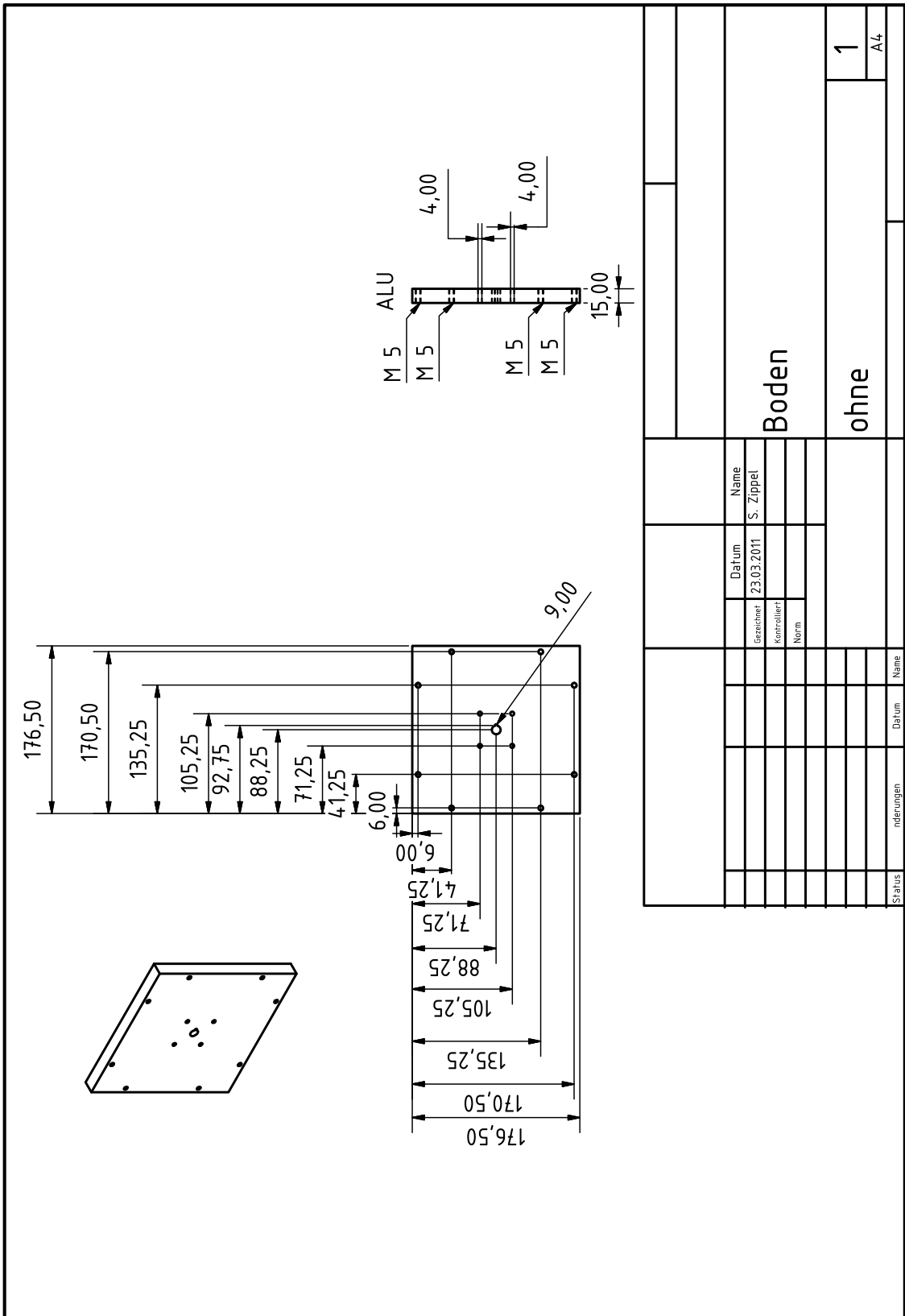
## **Anhang C Technische Zeichnungen**

In diesem Anhang sind alle technischen Zeichnungen angefügt.

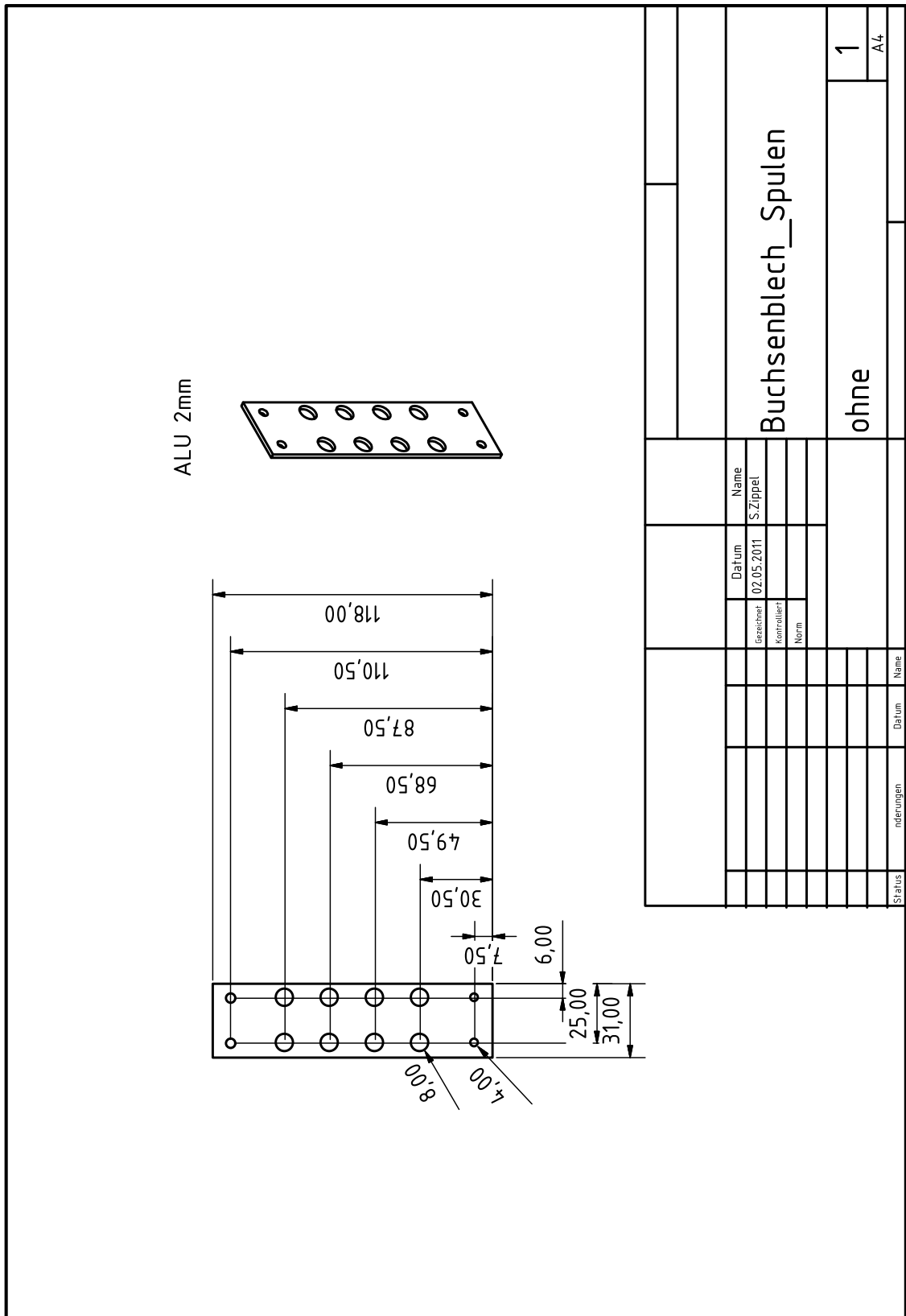
### **Abbildungsverzeichnis zu Anhang C**

C 1: Kreuzspulenkasten-Deckel.....	186
C 2: Kreuzspulenkasten-Boden .....	187
C 3: Buchsenblech für den Anschluss der Spulen .....	188
C 4: Halteblech für den Anschluss der Lüfter und Temperaturfühler .....	189
C 5: Halteblech für die Montage der 80mm Lüfter .....	190
C 6: E-Kern-Bleche .....	191





C 2: Kreuzspulenkasten-Boden

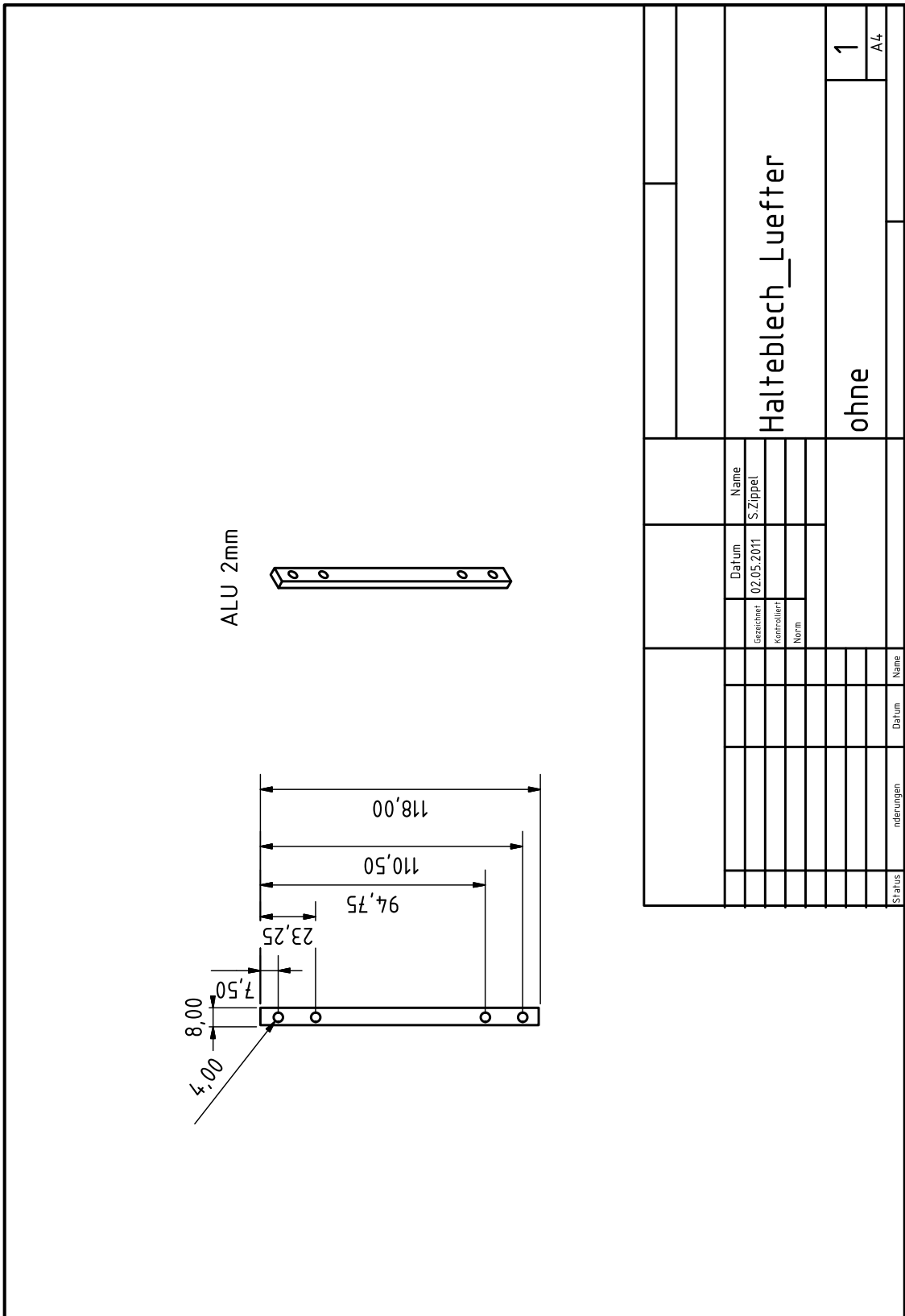


C 3: Buchsenblech für den Anschluss der Spulen

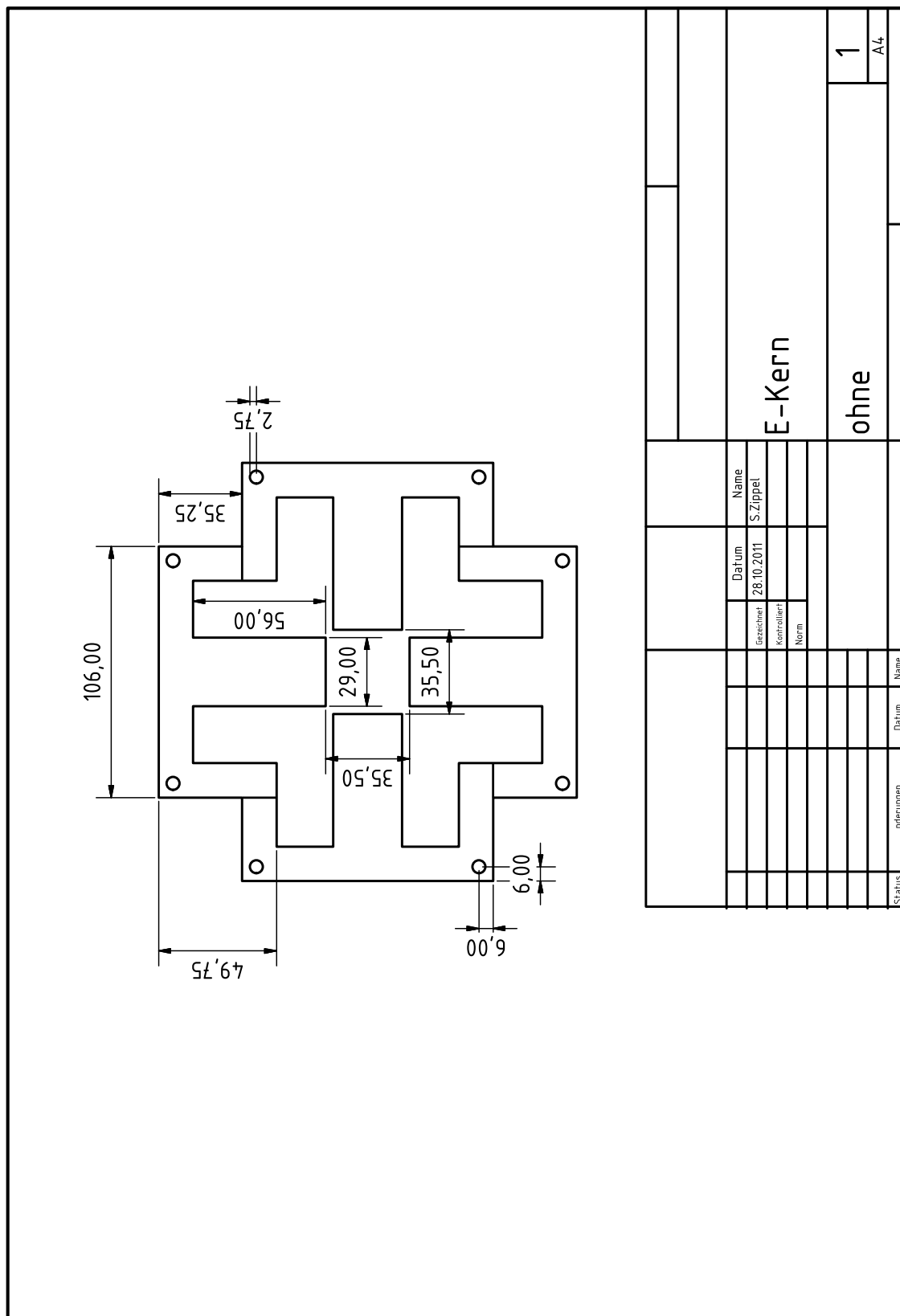
ALU 2mm

		Datum		Name	
				S. Zippel	
		Gezeichnet			
		Kontrolliert			
		Norm			
Halblech_Luefter_Buchsen					
ohne					
				1	
				A4	

C 4: Halblech für den Anschluss der Lüfter und Temperaturfühler



C 5: Halteblech für die Montage der 80mm Lüfter



C 6: E-Kern-Bleche

## **Versicherung über die Selbständigkeit**

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

Hamburg, 15. Dezember 2011

Ort, Datum

\_\_\_\_\_

Stefan Zippel