



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Experimentelle digitale Signalverarbeitung und Zustandserkennung für ABS-Sensoren ESZ-ABS

FuE-Projekt im Programm 'IngenieurNachwuchs'

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Berliner Tor 5
20099 Hamburg
Tel: 040 42875-9130/-8017/-9022
Fax: -9009

Projektleitung:
Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Fakultät Technik und Informatik
Department Informations- und Elektrotechnik
Tel: 040 42875-8350
E-Mail: karl-ragmar.riemschneider@haw-hamburg.de

Schlussbericht zum Vorhaben „Experimentelle digitale Signalverarbeitung und Zustandserkennung für ABS-Sensoren“ (ESZ-ABS)

Organisation

Zuwendungsempfänger:	HAW Hamburg, Fakultät TI, Berliner Tor 5, 20099 Hamburg
Förderkennzeichen:	17N0508
Vorhabensbezeichnung:	Experimentelle digitale Signalverarbeitung und Zustandserkennung für ABS-Sensoren
Kurzbezeichnung:	ESZ-ABS
Förderprogramm:	'IngenieurNachwuchs' des BMBF
Projektleitung:	Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider karl-ragmar.riemschneider@haw-hamburg.de
Wissenschaftlicher Mitarbeiter:	Dipl.-Ing. (FH) Martin Krey martin.krey@haw-hamburg.de
Forschungsbüro:	Martina Schultz martina.schultz@hv.haw-hamburg.de
Drittmittelbüro:	Norbert Burkschat norbert.burkschat@hv.haw-hamburg.de
Berichtszeitraum:	Sept. 2009 - Dez. 2012
Berichtsautoren:	Dipl.-Ing. (FH) Martin Krey Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragmar Riemschneider
Projektpartner	NXP Semiconductors Germany GmbH Hamburg Willi Mecklenburg GmbH Hamburg Plath GmbH Hamburg

Inhaltsverzeichnis

I	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung des Vorhabens	3
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	4
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit	7
II	Eingehende Darstellung der Ergebnisse	9
2.1	Experimentalplattformen für die Implementation	9
2.1.1	Experimentalplattform auf Mikrocontroller-Basis	9
2.1.2	Experimentalplattform auf FPGA-Basis	11
2.1.3	Signalkonditionierung	13
2.1.4	ASIC Integration von prototypischen Modulen	17
2.1.5	Übersicht über Implementierungsexperimente	20
2.2	Magnetische Charakterisierung mit Kreuzspulen-Messplatz	22
2.2.1	Errechnung des Sensorkennfeldes	25
2.2.2	Berechnung eines analytischen Kennfeldes	26
2.2.3	Kreuzspulenmessplatz für große Feldstärken	28
2.3	Radmessplatz für die Erfassung des Encoder-Sensor-Systems	30
2.3.1	Radmessplatz: Erstes Vormuster RMP1	30
2.4	Radmessplatz: Zweites Vormuster RMP2	32
2.4.1	Radmessplatz: Laborsystem RMP3	33
2.5	Sensor-Zustandsbestimmung und Signalsynthese	43
2.6	Demonstration für die Anwendung, Verwertung und Transfer	50
2.7	Studentische Arbeiten	50
2.8	Mögliche Schwerpunkte von Folgearbeiten	54
2.9	Erweiterung in der Zielsetzung und Fortschreibung des Arbeitsplans	54
III	Referenzen und studentische Arbeiten	56

I Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung des Vorhabens

Heute sind weltweit mehr als zwei Milliarden magnetische Sensoren in den ABS/ESP-Bremsystemen im Einsatz. Magnetische Sensoren werden außerdem in vielen anderen elektronisch gesteuerten Funktionen der Automobilelektronik verwendet. Zukünftige Anforderungen an die Sensoren gehen in Richtung weiter erhöhter Verlässlichkeit, die heutigen Möglichkeiten der Zuverlässigkeits- und Qualitätssicherung dafür sind bereits weitgehend ausgenutzt.

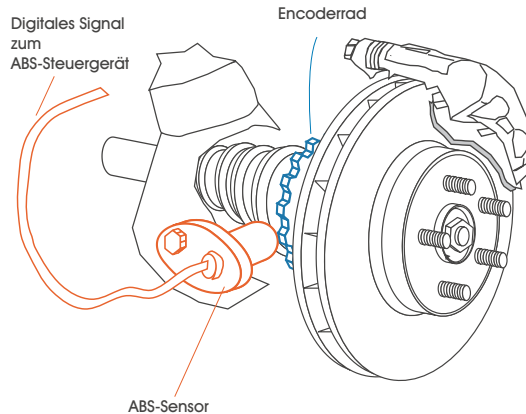


Abbildung 1.1: Sensoreinbau am Fahrzeugrad

Gelänge es jedoch zukünftig, die Sensoren selbst zu einer effektiven Eigendiagnose zu befähigen, könnte man die grundsätzlichen Limitierungen heutiger Prinzipien in der Qualitätssicherung überwinden. Die Prinzipien zielen auf die Einhaltung von spezifizierten Toleranzbereichen der verschiedenen mechanischen, magnetischen und elektrischen Parameter ab. Die Toleranzbereiche bilden zusammen ein Safe-Operation-Area (SOA) mit den Dimensionen dieser Parameter. Die Parameter werden in Fertigung geprüft, sie können jedoch nicht im laufenden Betrieb direkt überwacht werden.

Durch die digitale Signalausgabe der aktiven Sensoren ist keine Diagnose des Sensorsignals im Steuergerät möglich, da der eigentliche Informationsträger - das analoge Signal des magnetischen Sensors - an dieser Stelle nicht verfügbar ist. Somit ist eine Vorverlagerung der Diagnose direkt in den ABS-Sensor erforderlich. Weiterhin ist es erforderlich, dass zusätzlich zur Messgröße auch eine Angabe der Verlässlichkeit des gelieferten Messwertes übertragen wird. Aus dieser Vorverlagerung der Diagnose ergab sich die grundsätzliche Aufgabe des Vorhabens. Im einzelnen war die Erarbeitung von Diagnoseindikatoren, die durch Signalverarbeitung errechnet werden können, der wesentliche Lösungsansatz für die Aufgabe. Entsprechende Protokolle, die die Übertragung der Diagnoseinformationen beinhalten, sind bereits vom VDA (Verband der Automobilhersteller) spezifiziert worden. Der VDA zeigt durch die Definition eines einheitlichen Protokolls den Bedarf einer Sensor-Eigendiagnose an.

Derzeit ist im Steuergerät eine Diagnose der ABS-Sensoren nur durch Prüfung der Plausibilität des Sensorsignals möglich. Neueste Sensorprodukte sind mit einer Eigendiagnose ausgestattet, die jedoch bisher nur die Sensoramplitude des Sensors auswertet. Die Amplitude des Sensorsignals ist in vielen Fällen mehrdeutig und kann alleine keinen ausreichend zuverlässigen Indikator für den Sensorzustand liefern. Es ist erforderlich, dass eine Abweichung vom sicheren Arbeitspunkt erkannt wird.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Von den ABS-Sensoren wird generell eine sehr hohe Zuverlässigkeit erwartet. Die Zuverlässigkeit, die im Automobilbereich von Sensoren und Modulen gefordert wird, gibt Reif [31] mit einer maximalen Ausfallrate von < 10 ppm in einem Zeitraum von 10 Jahren oder einer Fahrleistung von 150 000 km an.¹ Weiterhin weist Reif darauf hin, dass der Wert für Sensoren von Passagierschutzsystemen wesentlich niedriger ist. Die Firma NXP Semiconductors gibt an, dass das Ziel für die Ausfallraten ihrer ABS-Sensoren im Bereich von < 1 ppm liegt [23]. Der Markt fordert neue Funktionen, eine höhere Auflösung und eine weitere Miniaturisierung der Sensoren, um unter anderem eine direkte Integration im Radlager zu ermöglichen. Dieses führt zu einer steigenden hohen Funktionsdichte bei gleichbleibend hohen Robustheitsanforderungen. Die Robustheit des Sensors erfordert die Widerstandsfähigkeit gegenüber starken Temperaturschwankungen, mechanischem Stress und elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV). Die Zuverlässigkeits- und Qualitätsstandards wachsen, da die Informationen der ABS-Sensoren für immer mehr Systeme im Fahrzeug eingesetzt werden. Die ISO-Norm ISO 26262 „Road vehicles – Functional safety“ [8] beschäftigt sich unter anderem mit dem Thema der funktionalen Sicherheit von sicherheitsrelevanten elektronischen Systemen im Automobil. Die Automobilindustrie fordert von ihren Zulieferern die Einhaltung dieser Normen und überwacht die Qualitätsstandards durch weit entwickeltes Qualitätsmanagement.

1.3 Planung und Ablauf

Das Vorhaben gliederte sich in acht Arbeitspakete. Im einzelnen wurden in den Arbeitspaketen folgende Aufgaben erfüllt:

0. Das Arbeitspaket AP0 umfasste am Projektstart die organisatorische Sicherstellung und die Detailplanung. Es wurden räumliche und materielle Voraussetzungen geschaffen und das Projektteam aufgestellt. Wichtigste Aktivität war die Gewinnung des wissenschaftlichen Mitarbeiters und dessen Einarbeitung.
1. Das Arbeitspaket AP1 umfasste verschiedene Implementationsvarianten auf unterschiedlichen Experimentalplattformen. Zunächst wurde mit eigenen diskreten Aufbauten auf der Basis von Controller-Boards gearbeitet, die sowohl analoge wie auch digitale Signalverarbeitung und verschiedene Schnittstellen umfassten. Danach wurden Teile der digitalen Signalverarbeitung in VHDL auf FPGA Plattformen erprobt. Damit wurden die Voraussetzungen erarbeitet, um letztlich die wichtigsten Blöcke der Signalverarbeitung in ASIC Blöcken zu implementieren und prototypisch zu realisieren. Der Abschnitt 2.1 schildert die Varianten der aufeinander aufbauenden Plattformen im Detail.
2. Das Arbeitspaket AP2 ist eines von zwei Arbeitspaketen bei den eigene Messmittel entstanden sind. Hier wurde ein modularer Kreuzspulenmessplatz entwickelt, der in Verbindung mit einer automatisierten Steuerung wertvolle Charakterisierungsdaten der Sensormessbrücken liefert. Auch diese Arbeiten werden im Abschnitt 2.2 dargestellt. Dort werden sie gemeinsam mit den zusätzlich entwickelten Verfahren der Sensor-Signal-Synthese erklärt, weil die Ergebnisdaten des Kreuzspulenmessplatzes eine der Voraussetzungen für dieses neuartige Verfahren waren.
3. Das Arbeitspaket AP3 ist ein weiteres Arbeitspaket, in dem spezifische Messmittel selbst entwickelt und erstellt wurden. Mit dem stufenweise entwickelten Radmessplatz wird es möglich, Encoder und Sensoren in beliebigen geometrischen Positionen praktisch zu betreiben. Damit können Ablagen und Fehlersituationen systematisch nachgebildet

¹Zum Vergleich gibt Reif die Ausfallrate eines Mobiltelefons über den gleichen Zeitraum mit ≈ 5000 ppm an.

werden. Details der Entwicklungen und der Ergebnisse im Projekt stellt Abschnitt 2.3 dar.

4. Das Arbeitspaket AP4 beschäftigte sich mit der Sensorzustandsbestimmung. Insbesondere war festzustellen, welche durch Signalverarbeitung zu errechnenden Ergebniswerte als aussagefähige Indikationen für die Eigendiagnose zu verwenden sind. Wie bei Vorhabensbeginn vermutet, haben sich Indikatoren auf Basis von Schätzungen von Anteilen der höheren Harmonischen als besonders signifikant erwiesen. Nachrichtentechnische Hintergründe und Details werden in der Dissertation Krey [17] dargestellt.
5. Das Arbeitspaket AP5 sollte den Ansatz verfolgen, inwieweit eine gesteuerte Brückenstromversorgung geeignet ist, das Problem des Ausgleichs des Offsets und der deutlich unterschiedlichen Aussteuerungen zu lösen. Die Lösung dieser Frage ist für die anschließende Signalverarbeitung grundlegend. Nach Abwägungen wurde dieser Ansatz zugunsten deutlich vertiefter Bearbeitung eines verbesserten Reglersystems für diese Signalvorverarbeitung nicht vertieft verfolgt. Abschätzungen haben ergeben, dass das Potential hier zu verbesserten Lösungen zu gelangen, deutlich höher ist. Das Potential an dieser Stelle hat sich beispielsweise mit dem im Vorhaben entstandenen neuartigen Ansatz des Lin-Log-Verstärkers klar bestätigt. Dieser Ansatz wird im Abschnitt 2.1.3 geschildert. Neben dem Lin-Log-Verstärker wurden auch konventionelle Regelungstechniken in analoger Hardware, die von einem gesonderten Mikrocontroller gesteuert ist, implementiert und zum Vergleich herangezogen.
6. Das Arbeitspaket AP6 hatte die Zielstellung, über Erfassung und Speicherung von Werten individuelle Exemplarabweichungen des Sensors und Einflüsse der Montage auszugleichen. Dieses Arbeitspaket wurde nach ausführlicher Diskussion mit dem Industriepartner aufgegeben, weil hierzu weit umfangreichere Messreihen mit großer Stückzahl von Sensoren notwendig gewesen wären. Diese Arbeiten gehören in die Produktentwicklung der Industrie und weniger an die Hochschule. Außerdem sollten die Aktivitäten des Vorhabens auf grundsätzliche Zusammenhänge und Ergebnisse fokussiert werden. Quantitative Analysen und die Bestimmung von Parametern wurden diesen Arbeiten, welche stärker zum Machbarkeitsnachweis beitragen, nachgeordnet. Die geplanten Kapazitäten des Arbeitspaketes wurden den Experimentalplattformen und den Demonstrationsaufbauten zugeordnet.
7. Das Arbeitspaket AP7 hatte Schwerpunkte im Bereich der Anwendung und Verwertung zum Inhalt. Hierzu zählt insbesondere die Demonstration der Machbarkeit und des Aufwandes der ASIC-Implementation. Außerdem wurden die Grundlagen für eine systematische Darstellung des Verfahrens erarbeitet. Dazu gehört auch die Formulierung einer Grundlagen-Patentanmeldung [11, 12], für die ein erfolgreicher Transfer in die Industrie gelang. Zur Verwertung gehört insbesondere der Wissenstransfer über mehrere Publikationen, die im Vorhaben entstanden sind. [14, 15, 20, 16, 17, 21].

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bei den magnetischen Sensoren im ABS-System sind seit etwa 1990 nacheinander drei Typengenerationen entstanden. Die Entwicklung der verschiedenen Sensorgenerationen ist in Abbildung 1.2 dargestellt. In der 1. Sensorgeneration wurden passive Sensoren verwendet, die nur aus einer Spule und einem Magneten bestanden und keine integrierten Schaltkreise enthielten. Eine Modulation des magnetischen Flusses aufgrund des bewegten Encoders bewirkt die Induktion einer Spannung in der Spule. Diese Induktionsspannung ist abhängig vom Gradienten der Flussänderung, was zu einer geschwindigkeitsabhängigen Sensorausgangsspannung führt. Der passive Sensor liefert somit nur ab einer definierten Geschwindigkeit ein

für das Steuergerät auswertbares Signal. Das analoge Signal des Sensors ist gleichzeitig die Schnittstelle zum Steuergerät.

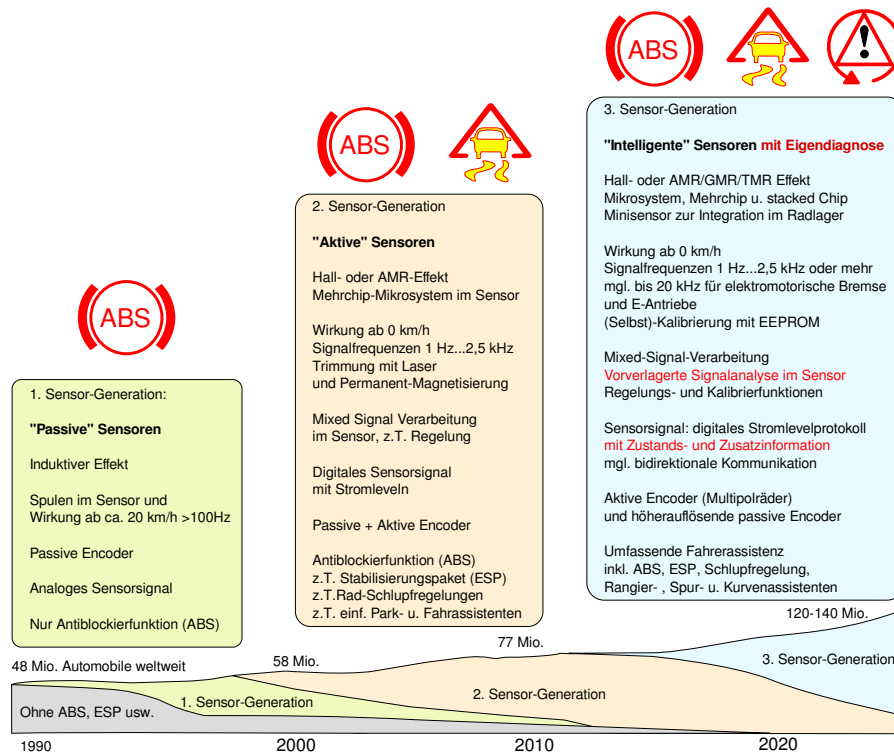


Abbildung 1.2: Übersicht über die verschiedenen Generationen der ABS-Sensoren und deren Marktanteile [32]

Der Nachteil der fehlenden Funktion aus dem Stillstand heraus (0 km/h-Fähigkeit) besteht in der 2. Sensorgeneration durch die Einführung aktiver Sensoren nicht mehr. Das Attribut „aktiv“ bedeutet, dass der Sensor über eine eigene Signalauswertung der analogen Sensorsignale in Form eines integrierten Schaltkreises verfügt. Die analogen Sensorsignale werden jetzt von Hall-Elementen oder magnetoresistiven Elementen (AMR) geliefert. Dieses bietet den Vorteil, dass auch ein konstanter magnetischer Fluss erfasst werden kann, womit erstmals die 0 km/h-Fähigkeit ermöglicht wird. Die integrierte Signalaufwertung beinhaltet eine einfache analoge Auswertung der Nulldurchgänge des Sensorsignals. Mit jedem Nulldurchgang des Sensorsignals wird über eine digitale Schnittstelle ein sogenannter Speed-Puls an das Steuergerät ausgegeben, welcher das Passieren eines Encoderzahns signalisiert.

Was zunächst einfach betrachtet einen Vorteil aufgrund der geringeren Störanfälligkeit der Schnittstelle bietet, ist bei genauerer Betrachtung ein Nachteil für die Diagnose des Systems. Das einfache digitale Stromprotokoll, was bei aktiven Sensoren eingesetzt wird, codiert streng genommen nur drei mögliche Informationen: Sensor ist angeschlossen, der Encoderzahn befindet sich vor dem Sensor oder der Encoderzahn befindet sich nicht vor dem Sensor. Dem Sensor ist es nicht möglich, Zusatzinformationen an das Steuergerät zu übertragen. Zusatzinformationen können beispielsweise den Zustand des Sensors beschreiben oder die Drehrichtung des Rades.

Um eine Übertragung von Zusatzinformationen zu ermöglichen, wurden noch in der 2. Generation verschiedene unidirektionale Protokolle zur Übertragung dieser Informationen eingeführt. Mit der Möglichkeit wurden auch Zusatzfunktionen, wie die Drehrichtungserkennung verfügbar. Die Protokolle sehen laut Spezifikation [4] auch die Übertragung von Diagnoseinformationen vor. Das aktuell genutzte Verfahren, um diese Diagnosefunktion zu implementieren, besteht in der einfachen Messung der Signalamplitude des Sensors. Wie später in der vorliegen-

den Arbeit gezeigt wird, ist die Signalamplitude als alleiniger Indikator wenig aussagekräftig für eine Diagnose.

Die Prognose für die zukünftige 3. Generation sind intelligente Sensoren mit folgenden Merkmalen:

- Eine erweiterte Eigendiagnose, die über eine integrierte digitale Signalverarbeitung umgesetzt wird. Die Diagnoseinformationen werden über vorhandene unidirektionale Protokolle an das Steuergerät übertragen. Diese erweiterte Eigendiagnose ist der Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln behandelt.
- Eine Erweiterung des Protokolls, um eine bidirektionale Kommunikation zu ermöglichen. Dieses erlaubt die Speicherung von Parametern in einem im Sensor befindlichen EEPROM. Bei diesen Parametern kann es sich um Parameter für die Regelung oder für die Diagnosefunktion handeln.
- Eine neues Verfahren, welches die derzeitige Offset- und Verstärkungsregelung beschleunigt. Besonders im Initialzustand, nach dem Einschalten der Versorgung des Sensors, müssen bisher erst einige Encoderzähne den Sensor passieren, damit der Sensor aktiv wird. Diese Zeit soll durch eine gleichzeitig wirkende Regelung verkürzt werden.
- Der Einsatz von neuen magnetischen Sensortechnologien, wie dem GMR-Effekt (Riesemagnetowiderstand) oder TMR-Effekt (magnetischen Tunnelwiderstand). Diese Technologien liefern eine deutlich größere relative Änderung des Widerstandes im Gegensatz zum derzeit verwendeten AMR-Effekt. Hiermit kann der maximale Abstand zwischen Sensor und Encoder weiter erhöht werden oder die notwendige analoge Verstärkung mit einigen negativen Einflüssen verkleinert werden.
- Eine Erhöhung der Encoderauflösung, was zu einer Steigerung der maximalen Signalfrequenz im Sensor auf bis zu 20 kHz führt. Die erhöhte Encoderauflösung wird für eine Steigerung der Regelfrequenz des Antiblockiersystems benötigt, die im Zuge der zukünftigen Entwicklungen elektromotorischer Bremsen möglich werden [2]. Das derzeitige hydraulische Bremssystem ist auf circa 10 Regelvorgänge pro Sekunde begrenzt. Durch die Steigerung der Regelfrequenz in Kombination mit elektromotorischen Bremsen soll der Bremsvorgang weiter optimiert werden können.

1.5 Zusammenarbeit

Im Projekt wurde mit den Firmen NXP Semiconductors, Plath GmbH und WM Maschinentechnik GmbH zusammengearbeitet. Die Auswahl der Partner ergänzte sich durch ihre Kompetenzen. NXP Semiconductors ist Hersteller von magnetischen Sensoren, insbesondere von Sensoren, welche den AMR-Effekt nutzen. Diese Sensoren war ein besonders gut geeigneter Ausgangspunkt im Vorhaben, weil hier nichtlineare Effekte des Sensors und des magnetischen Systems des Encoders zusammen wirken. Ein Teil der Sensoren wird von Automobilzulieferern als ABS-Sensoren in die Bremssysteme eingebracht. Die Kompetenz der Firma Plath sind im speziellen die nachrichtentechnischen Signalverarbeitungsverfahren. Das Know-How von WM Maschinentechnik liegt in der mechanischen Konstruktion und Fertigung von feinmechanischen Aufbauten wie z.B. der Positioniereinrichtung der Messplätze.

Der Kontakt zu den Projektpartnern wurde durch wechselseitige Besuche und Teilnahme an einem Firmenkolloquium kontinuierlich vertieft. Dabei ist wichtiges Wissen ausgetauscht worden und zahlreiche Zwischenergebnisse konnten fachlich diskutiert werden.

Insbesondere mit der Firma NXP wurde unmittelbar zusammengearbeitet. Es wurden Material, Informationen und Unterlagen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen von studentischen

Arbeiten konnten Messmittel der Firma NXP genutzt werden. Weiterhin wurde die Inbetriebnahme des im Projekt entstandenen ASIC von NXP maßgeblich unterstützt. Mit Experten der Firma Plath wurden Signalverarbeitungsverfahren, insbesondere deren FPGA-Realisierung, diskutiert.

Für die gute Zusammenarbeit spricht die Übernahme von drei Absolventen aus dem Projektteam als Entwicklungsingenieure in die Sensorentwicklung beim Projektpartner NXP. Ebenso zu erwähnen ist die Übernahme zweier Absolventen bei einem Automobilhersteller.

II Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden sind die im Vorhaben erreichten Ergebnisse dargestellt, dabei wird zunächst entsprechend der Arbeitspakete gegliedert. Die übergreifenden Aspekte sind danach dargestellt.

Die Darstellung der Ergebnisse soll einen Überblick über den erreichten Stand ermöglichen. Weitergehende Vertiefungen und theoretische Analysen sind darüber hinaus der geplanten Dissertation Krey [17] zu entnehmen. Außerdem können technische Details auch den studentischen Arbeiten entnommen werden, die über das Internetportal der HAW Hamburg verfügbar sind.

2.1 Experimentalplattformen für die Implementation

2.1.1 Experimentalplattform auf Mikrocontroller-Basis

In der Mikrocontroller basierten Variante wurde ein Mikrocontroller MSP430F1611 von Texas Instruments verwendet. Diese Mikrocontrollerfamilie MSP430 zeichnet sich durch besonders geringe Stromaufnahme aus und verfügt über integrierte analoge Komponenten, wie Komparatoren, AD-Umsetzer und DA-Umsetzer. Diese analogen Komponenten ermöglichen bei dem Signalcontroller auf Mikrocontroller-Basis eine minimale externe Beschaltung. Für die Erkennung der Nulldurchgänge kann ein integrierter Komparator in Kombination mit einem Digital-Analog-Umsetzer verwendet werden. Die Abtastung erfolgt mit einem integrierten 12-Bit AD-Umsetzer. In der Abbildung 2.1 ist der Aufbau des Signalcontrollers in einem Blockschaltbild dargestellt. Die analogen Komponenten sind im Block der Abtastung und Nulldurchgangserkennung enthalten. Bei den nachfolgenden drei Blöcken handelt es sich um die Implementierung der Funktionen der winkeläquidistanten Abtastung, die Bestimmung der Harmonischen und die Berechnung des Verzerrungsindikators.

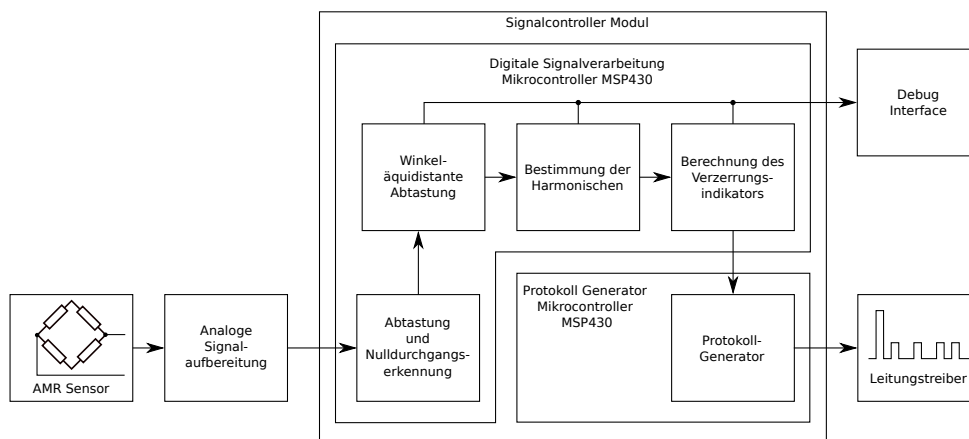


Abbildung 2.1: Blockschaltbild des Signalcontroller-Moduls auf Mikrocontroller-Basis

Die Protokoll-Ausgabe als Schnittstelle zum ABS-Steuergerät ist im Modul des Protokoll-Generators implementiert. Bei dem Protokoll ist ein genaues Zeitverhalten vorausgesetzt. Weil dies auch für die vorgeschaltete Signalverarbeitung gilt, musste hierfür ein separater Mikrocontroller, welcher ebenfalls aus der MSP430 Familie stammt, vorgesehen werden. Der Signalcontroller ist als aufgebautes Modul in Abbildung 2.2 dargestellt. Er wurde in Rahmen der Abschlussarbeit Jegenhorst [10] entwickelt.

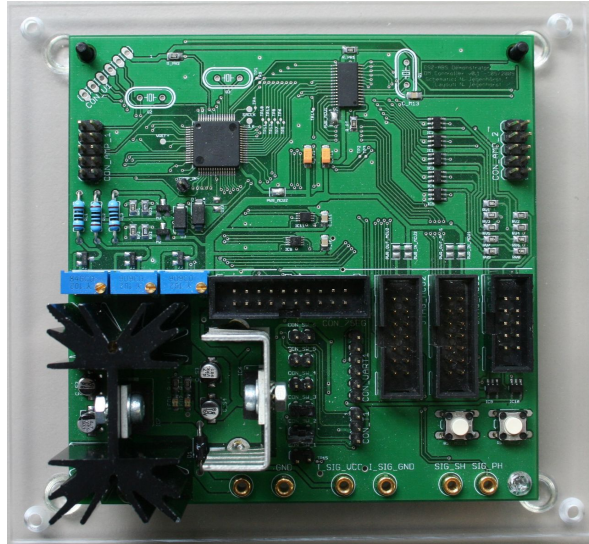


Abbildung 2.2: Signalcontroller-Modul auf Mikrocontroller-Basis [10]

Die Verwendung von mehreren Controllern hat den Vorteil, dass bereits jetzt parallele Abläufe auf getrennten Controllern durchgeführt werden können. Das ähnelt der Parallelfunktion in der späteren Hardwareumsetzung.

Als Zusatzmodule für diese Experimentalplattform entstanden weiterhin:

- Ein Verstärkermodul mit zwei Halbbrückenverstärkern und einem in Verstärkung und Offset steuerbaren Differenzverstärker.
- Das Anzeigemodul dient der Überwachung bei der Entwicklung und Erprobung und der Demonstration.

Das Gesamtsystem mit dem Radmessplatz 1 bei einer Erprobung ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

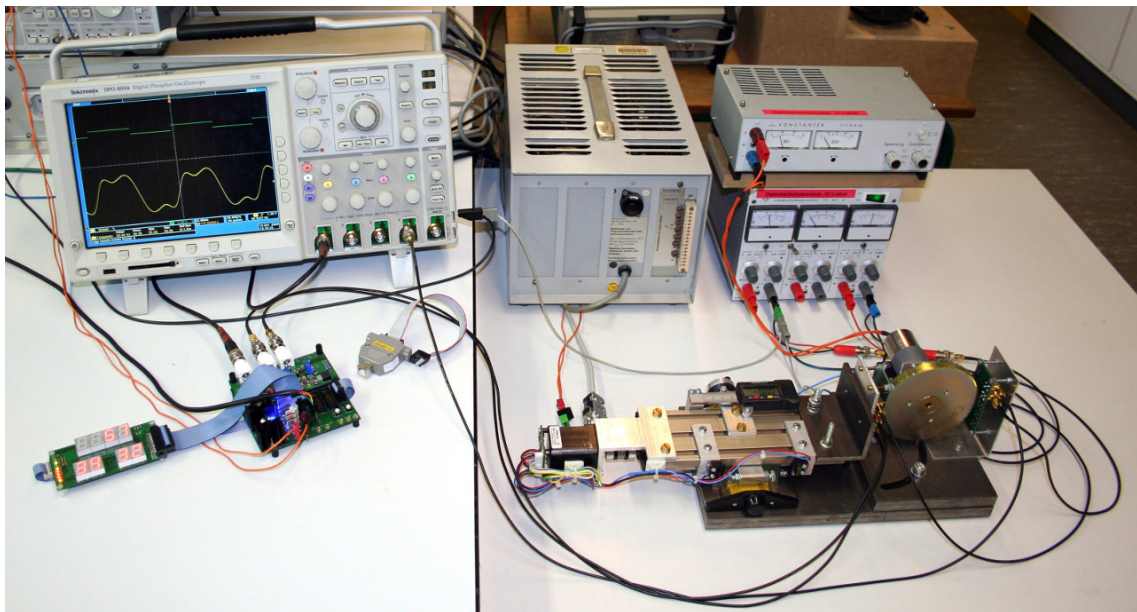


Abbildung 2.3: Messaufbau, links Experimental-Plattform, rechts Vormuster des Radmessplatzes (RMP1)

Es wurden sehr deutliche Ergebnisse erreicht, die Aussagefähigkeit ist zunächst qualitativer Natur, da die Messmittel erst später fertig werden. Die Ergebnisse wurden mit unabhängigen Resultaten aus erfassten Rohdaten und einer Berechnung mit dem Softwaretool Matlab verglichen (Abbildung 2.4).

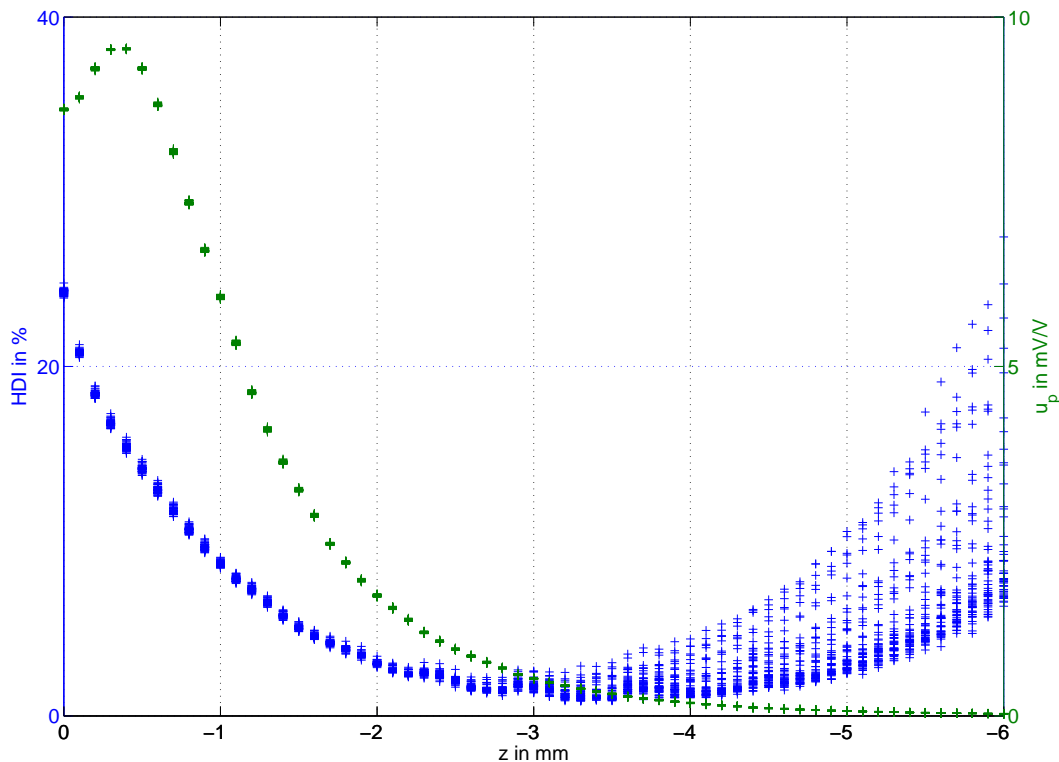


Abbildung 2.4: Anteil der Harmonischenverzerrung als Diagnoseindikator HDI (blau) und Sensorspitzenspannung U_p (grün) über den Sensor-Encoder-Abstand (sog. Airgap) in der Achse z -Achse aufgetragen, für jede der ca. 3000 ausgewerteten Zahnperioden wurde ein Kreuz gezeichnet

2.1.2 Experimentalplattform auf FPGA-Basis

Aufgrund der begrenzten Rechenleistung der Mikrocontroller-basierten Experimentalplattform wurden hier spezielle Abtastverfahren implementiert. Die Arbeit [13] hat gezeigt, dass eine Erhöhung der Abtastrate neue Indikatoren über den Zustand des Encoderrades liefert. So können beispielsweise unrundlaufende Encoderräder erkannt werden. Dies kann durch nicht präzise montierte oder deformierte Encoderräder und nicht ausreichend präzise montierte Achsenverhältnisse in den ersten Messaufbauten oder in der Praxis durch Montagefehler, Fertigungsabweichungen oder Lagerschäden hervorgerufen werden. Diese theoretischen Arbeiten waren Grundlage und Ausgangspunkt für die zweite Realisierung der Experimentalplattform.

In den studentischen Arbeiten [6], [7] und [1] wurde eine neue Experimentalplattform auf FPGA-Basis entwickelt. Ziel dabei war es, die in der systemanalysierenden Diplomarbeit [13] entwickelten und untersuchten Verfahren umzusetzen und eine Basis für die spätere Chipintegration zu liefern. Die FPGA-Experimentalplattform, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, besteht aus folgenden Modulen:

- Ein Verstärkermodul mit zwei Halbbrückenverstärkern und einem in Verstärkung und Offset steuerbaren Differenzverstärker. Dieses Modul wird ebenfalls bei der Experimentalplattform auf Mikrocontrollerbasis eingesetzt.

- Die ADC-Platine mit einem 4-Kanal 12-Bit AD-Umsetzer für die Signale des Verstärkermoduls, einem 8-Kanal 12-Bit DA-Umsetzer für die Einstellung von Offsets und 4 Komparatoren für Schaltschwellen, welche ebenfalls mit dem DA-Umsetzer festgelegt werden können. Grundsätzlich sind diese Komponenten, welche bei der Mikrocontroller-Experimentalplattform bereits im Controller integriert sind.
- Dem Nexys2-Board mit einem Xilinx Spartan 3E FPGA und einer Anzeigeeinheit, welches die Aufgabe der Signalverarbeitung, Regelung und Datenausgabe an den PC übernimmt.

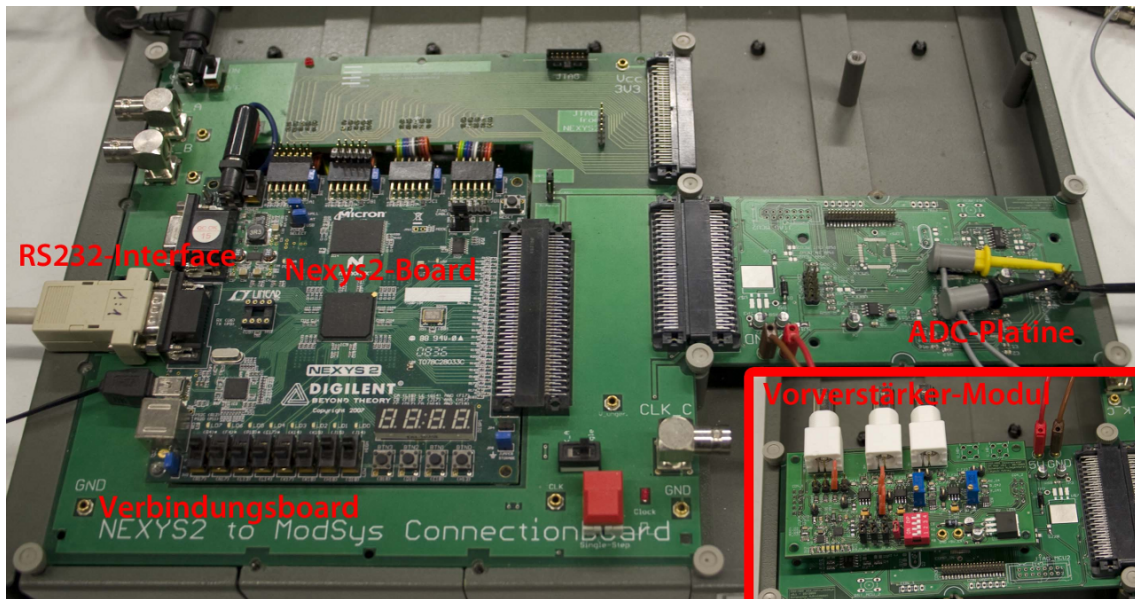


Abbildung 2.5: Experimentalplattform auf FPGA-Basis für die VHDL-Implementierung des Harmonischen-Schätz-Verfahrens [7] und passend realisiertes Analoginterface [1]

Die FPGA-Hardware wurde auf der Basis der Xilinx-Toolchain in VHDL programmiert, mit dem Simulationstool Modelsim simuliert und erfolgreich synthetisiert. Die implementierten Module sind im Blockschaltbild in Abbildung 2.6 dargestellt. Neben dem erfolgreichen Funktionsnachweis mit Sensorsignalen konnten erste Abschätzungen zum Zeit- und digitaltechnischen Aufwand abgeleitet werden.

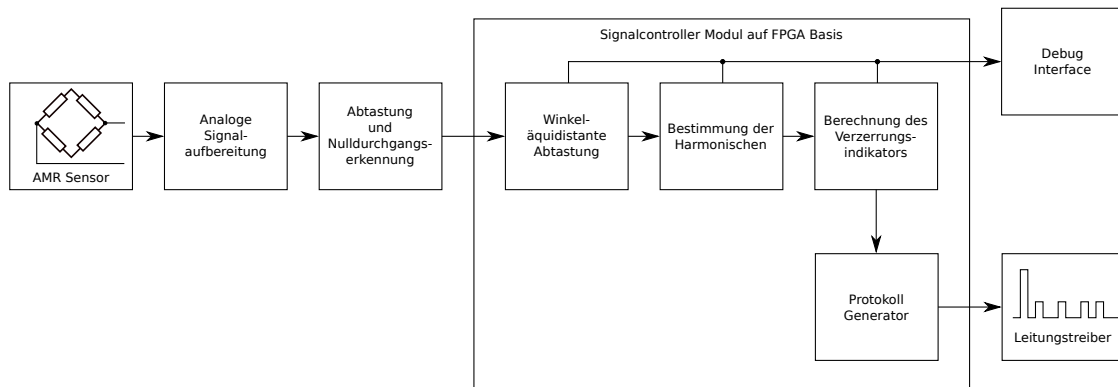


Abbildung 2.6: Blockschaltbild des Signalcontrollers auf FPGA Basis

2.1.3 Signalkonditionierung

In dem vorherigen Abschnitt 2.1.1 wurde bereits ein Modul der Experimentalplattform für die analoge Vorverarbeitung mit entsprechender Offset- und Verstärkungsregelung auf der Basis einer Duty-Cycle-Erfassung beschrieben. Obwohl damit die Aussteuerung des Analog-Digital-Umsetzers im Normalfall sehr gut sichergestellt wurde, wurden auch Grenzen dieses Ansatzes erkannt. Diese Grenzen wirken sich beispielsweise immer dann aus, wenn der Encoder deformiert oder unrund läuft. Bei aktiven Encodern tritt ein vergleichbarer Effekt bei ungleichmäßiger Magnetisierung auf. Diese Effekte sind unter anderem in einer Diplomarbeit gezeigt worden [13].

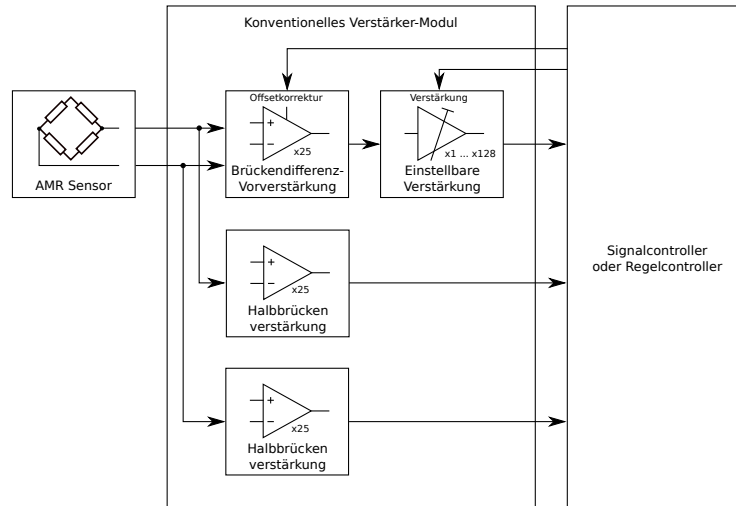


Abbildung 2.7: Blockschaltbild konventionelles Verstärker-Modul

Für diese Fälle erwies sich die bisher benutzte Regelung aus Abbildung 2.7 als konzeptionell nachteilig. Es war bisher notwendig, mehrere Zyklen des Eingangssignals für eine Korrektur zu erfassen. Somit kann einem schnell variierender Offset ebenso wie eine schnell schwankende Amplitude nicht ausreichend schnell ausgeregelt werden.

Lineare/logarithmische Verstärkerbank - Lin/Log-Verstärker

Im Rahmen von Konzeptdiskussionen mit Experten des Industriepartners NXP entstand das Konzept, die Regelung nicht in nacheinander erfolgenden Schritten der Offset- und Verstärkungsanpassung durchzuführen, sondern diese beiden Dimensionen der Ausregelung grundsätzlich zu trennen. Mit einem konventionellen Verstärker kann dies jedoch nicht erreicht werden. Weil die für eine gute Aussteuerung des Analog-Digital-Umsetzers notwendige Verstärkung im Bereich von ca. 25 bis ca. 3200-facher Verstärkung eingestellt werden muss, konnte sie bisher nicht von der Offset-Einstellung abgetrennt werden. Im Anschluss eines Schaltvorgangs der Verstärkung musste eine Offsetnachführung durchgeführt werden und umgekehrt. Daher waren typischerweise mehrere Regelschritte verbunden mit neu zu erfassenden Encoderperioden notwendig (s.a. Initialmode heutiger Serien-Sensoren). Ansonsten übliche Lösungen - wie Wechselspannungskopplung mit einem Kondensator - scheiden durch die niedrige untere Grenzfrequenz und die erforderlichlich Chiprealisierung aus.

Im Projektteam entstand daher das Konzept, einen logarithmischen Verstärker einzusetzen. Das neue Konzept ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

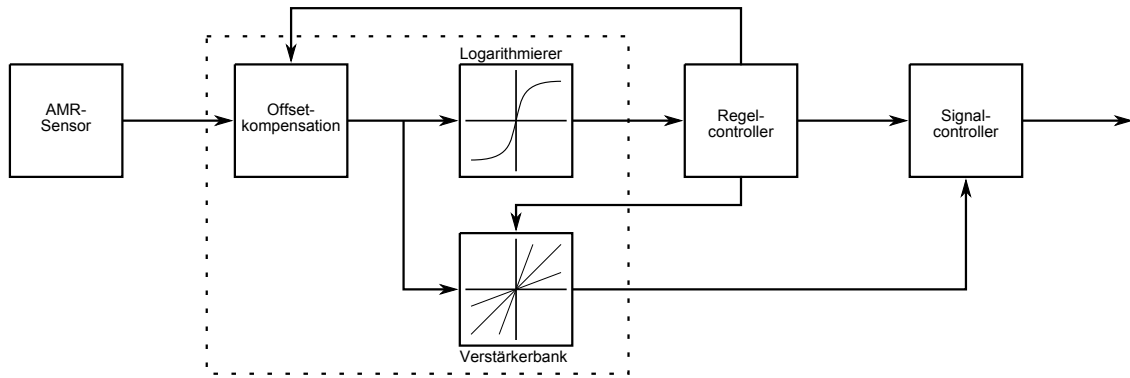


Abbildung 2.8: Blockschaltbild der Experimentalplattform mit der linear/logarithmischen Verstärkerbank als neuartige Ansatz der analogen Sensor-Signalvorverarbeitung

Erste Versuche und Simulationen zeigten, dass eine konventionelle Realisierung eines logarithmischen Verstärkers ungeeignet ist. Daher wurde das Konzept einer stufenweisen Approximation der logarithmischen Verstärkung durch eine Bank linearer Verstärker untersucht. Der approximiert logarithmische Verstärker nähert die Logarithmus-Funktion durch die Summierung unterschiedlich linear verstärkter Signale an. Der Aufbau des approximiert logarithmischen Verstärkers ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

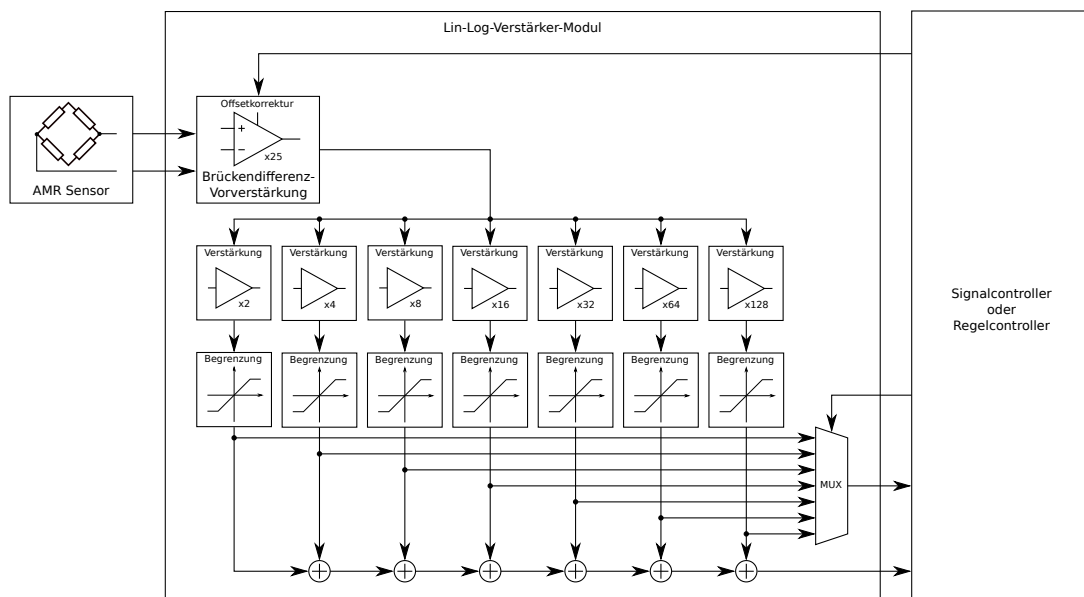


Abbildung 2.9: Aufbau eines der drei gleichartigen Module des Lin-Log-Verstärkers in der parallelen Variante, hier in der Verwendung für das Brückendifferenzsignal

Die Kennlinie eines solchen approximiert logarithmisch Verstärkers für unterschiedliche Eingangsspannungen ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

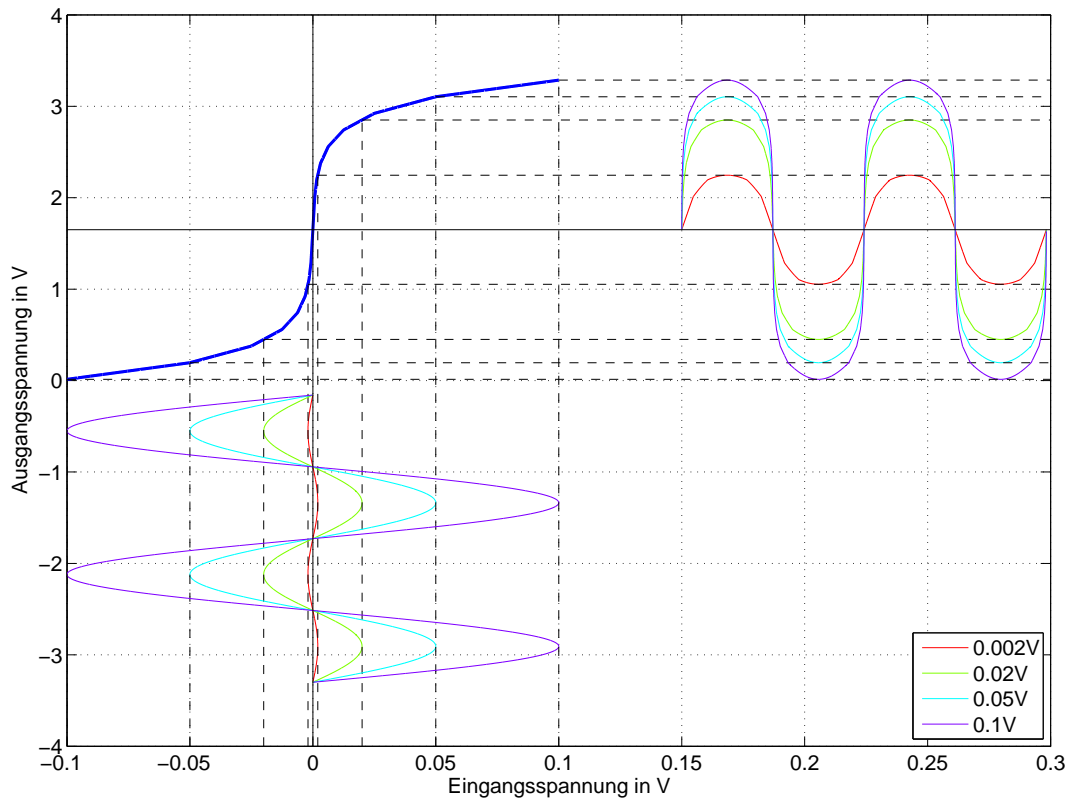


Abbildung 2.10: Kennlinie des approximiert logarithmischen Verstärkers (blau) mit Eingangssignalen unterschiedlicher Amplituden auf der Abszisse und den Ausgangssignalen auf der Ordinate. Bei den angegebenen Spannungswerten handelt es sich um Spitzenspannungen.

In der Bachelorarbeit Ostermann [25] wurde dieser approximiert logarithmischer Verstärker diskret mit Operationsverstärkern aufgebaut. Die aufgebauten Module sind in Abbildung 2.11 dargestellt. Es existieren drei Lin-Log-Module (Abbildung 11(a)), eines zur Verstärkung der Brückendifferenzspannung und zwei zur Verstärkung der Halbbrückenspannungen. Ein weiteres Modul zum Anschluss der Lin-Log-Module an den Signalcontroller ist im Gesamtaufbau in Abbildung 11(b) dargestellt.

Zunächst wurde in Anlehnung an Konzepte integrierter logarithmischer Verstärker-ICs, wie sie von der Firma Analog Devices oder Texas Instruments angeboten werden, eine serielle Kette von Verstärkern untersucht. Eine praktische Realisierung der seriellen Kette war wegen der Schwingneigung problematisch, die auf den stufenweise entstehenden Phasengang und weitere Schaltungsbesonderheiten zurückzuführen ist. Daher wurde ein weiterer Aufbau mit einer parallelwirkenden Verstärkerbank mit stufenweise erhöhter Verstärkung realisiert. Der Phasengang wurde durch umfangreiche Simulationen und Messungen kompensiert. Mit einem neuen Regelalgorithmus konnte nun der Offset bereits in einem einzigen Signalzyklus bestimmt und im nächsten ausgeregelt werden. Gleichzeitig wurde die passende Verstärkung unmittelbar vom logarithmierten Signal abgeleitet. Letztlich ist damit über eine Analog-Multiplexer-Schaltung direkt die am besten ausgesteuerte Verstärkerstufe dem ADC zuzuführen. Diese direkte Anschaltung des 'besten' Signals ist deshalb möglich, weil sich der logarithmische Verstärker aus einer Bank linearer Verstärkerstufen zusammensetzt. Das neue Konzept ist auf starkes Interesse des Sensorherstellers NXP gestoßen und soll weiter untersucht werden.

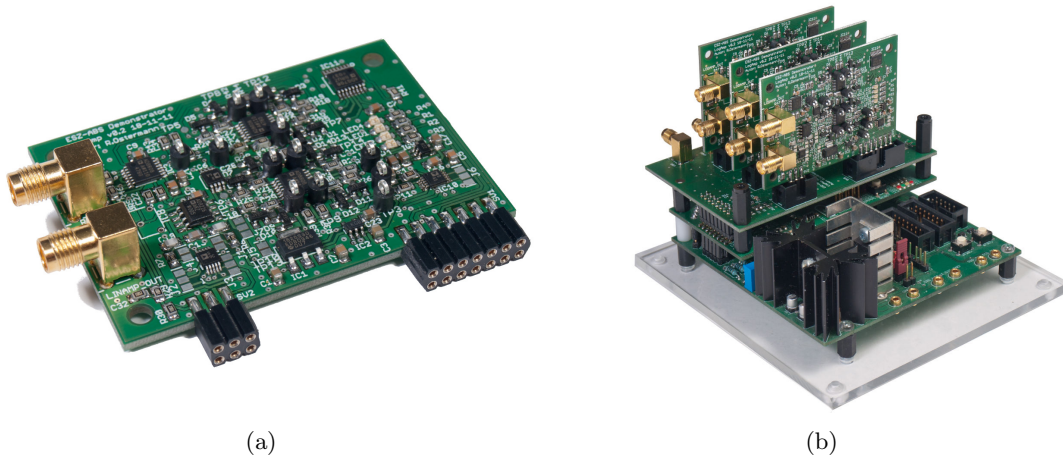


Abbildung 2.11: Lin-Log-Verstärker-Modul (a) und gesamter Aufbau mit drei Lin-Log-Verstärker-Modulen für das Brückendifferenzsignal und die beiden Halbbrückensignale (b) [25]

Regelcontroller-Modul

Die Steuerung der analogen Signalaufbereitung aus dem vorherigen Abschnitt übernimmt das Regelcontroller-Modul. Das Regelcontroller-Modul kann für das konventionelle Verstärker-Modul wie auch mit dem Lin-Log-Verstärker-Modul verwendet werden. In der Abbildung 2.12 ist das Blockschaltbild dargestellt.

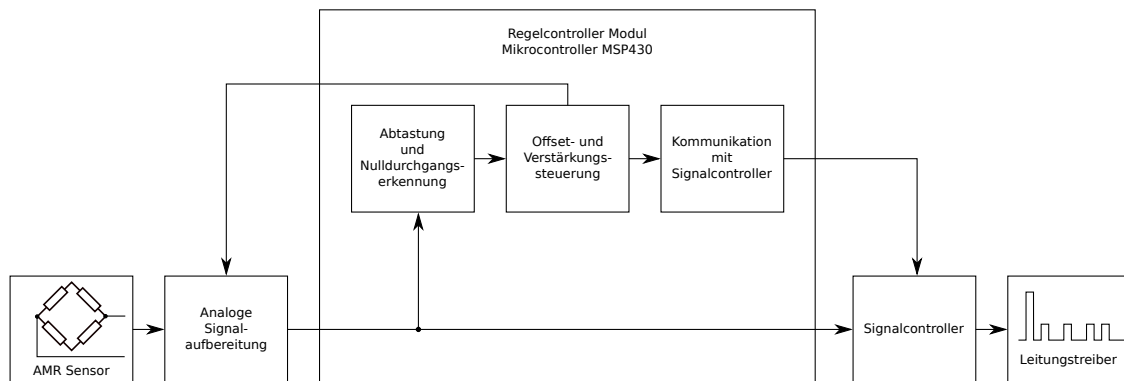


Abbildung 2.12: Blockschaltbild des Regelcontrollers

Im Regelcontroller-Modul wird das Signal zunächst abgetastet. Dann werden die Minimal- und Maximalwerte sowie das Tastverhältnis ausgewertet. Die Extremwerte des Signals dienen hierbei zur Regelung der Verstärkung. Das Tastverhältnis wird für die Regelung des Offsets benutzt. Über analoge und digitale Steuersignale wird im Modul für die analoge Signalaufbereitung der Offset bzw. die Verstärkung eingestellt.

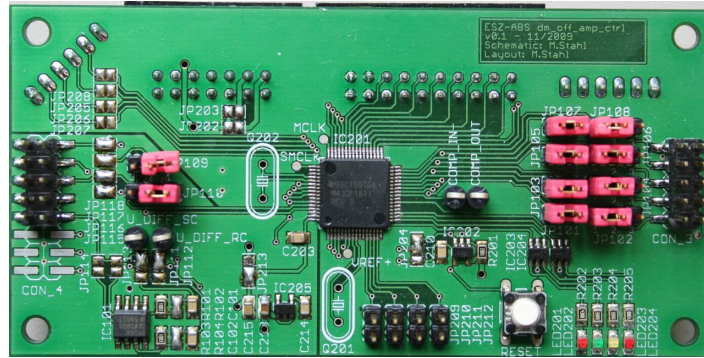


Abbildung 2.13: Regelcontroller-Modul [37] mit einem Mikrocontroller MSP430F1611.

Zusätzlich kommuniziert das Regelcontroller-Modul mit dem Signalcontroller, um die Gültigkeit des Sensorsignals für die Diagnose zu signalisieren. Somit wird verhindert, dass während eines Regelvorgangs eine Abtastung im Signalcontroller stattfindet und ein ungültiger Diagnoseindikator berechnet wird. In der Abschlussarbeit Stahl [37] wurde das Regelcontroller-Modul aus Abbildung 2.13 für die Verwendung mit dem konventionellen Verstärkermodul entwickelt und aufgebaut. Die Anpassung der Regelalgorithmen des Regelcontroller-Moduls für die Verwendung mit den Lin-Log-Verstärker-Modul wurde ebenfalls in der Bachelorarbeit Ostermann [25] vorgenommen.

2.1.4 ASIC Integration von prototypischen Modulen

Unabhängig vom Vorhaben ESZ-ABS konnten finanzielle Mittel für die Einrichtung eines Chipdesign-Labors in Rahmen des Konsortiums Europractice eingeworben werden. Dieses ermöglichte erstmalig an der HAW Hamburg die Entwicklung von integrierten Schaltkreisen. Diese Gelegenheit wurde genutzt, um über anfänglichen Projektplan hinaus ASIC-Implementation von einigen Modulen umzusetzen. Ziel waren Aussagen zu Flächenbedarf und Stromaufnahme des Diagnoseverfahrens. Die Aussagen waren sehr wertvoll für die übersichtliche Aufwandsbeurteilung. Sie sind noch auf moderne Halbleiterprozesse zu skalieren, weil aus Kostengründen nicht die heute aktuellen Technologieknoten für die Musterfertigung mit Hilfe von Europractice gewählt worden sind.

In der Masterarbeit Sabotta [34] konnte ein erster Mixed-Signal-ASIC in $0.35\ \mu\text{m}$ Technologie entwickelt werden. Diese Arbeit basiert auf Erkenntnissen aus den vorher entwickelten Experimentalplattformen. Auf dem ASIC wurde die analoge Signalaufbereitung mit einem Instrumentenverstärker und einem AD-Umsetzer und die digitale Signalverarbeitung realisiert. Zusätzlich wurde der Protokoll Generator für die Ausgabe des AK-Protokolls integriert. Auf eine Regelung der Verstärkung und des Offsets wurde aus Gründen des Aufwandes und der zunächst noch möglichen geringen Flexibilität für die Vormuster verzichtet. Eine Übersicht über die enthaltenen Komponenten zeigt die Abbildung 2.14.

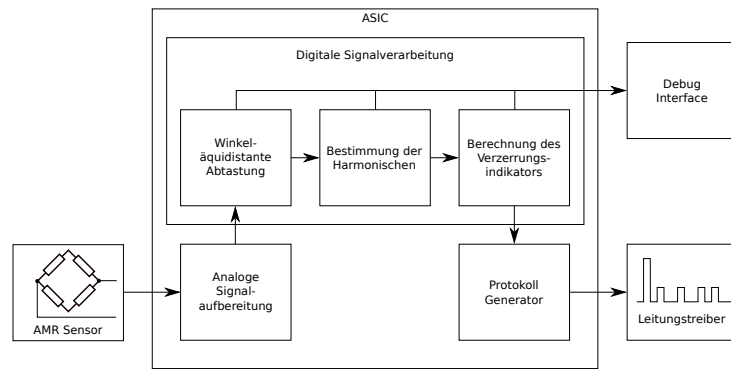


Abbildung 2.14: Blockschaltbild des ASIC

In der Abbildung 2.15 ist das Layout des ASIC und der Silizium-Chip (Die) im JLCC84 Gehäuse dargestellt. Bei einem Großteil der 84 Anschlusspins handelt es sich um Zwischensignale, die zu Debug-Zwecken ausgegeben werden. Die Zwischenergebnisse der digitalen Signalverarbeitung werden über eine schnelle serielle Schnittstelle ausgegeben. Zur Verarbeitung dieser Daten und der Übertragung zum PC wird im Testsystem in Abbildung 2.16 ein FPGA-Board eingesetzt. Das Testsystem ermöglicht, ebenso wie die anderen Experimentalplattformen, den direkten Anschluss des AMR-Sensors.

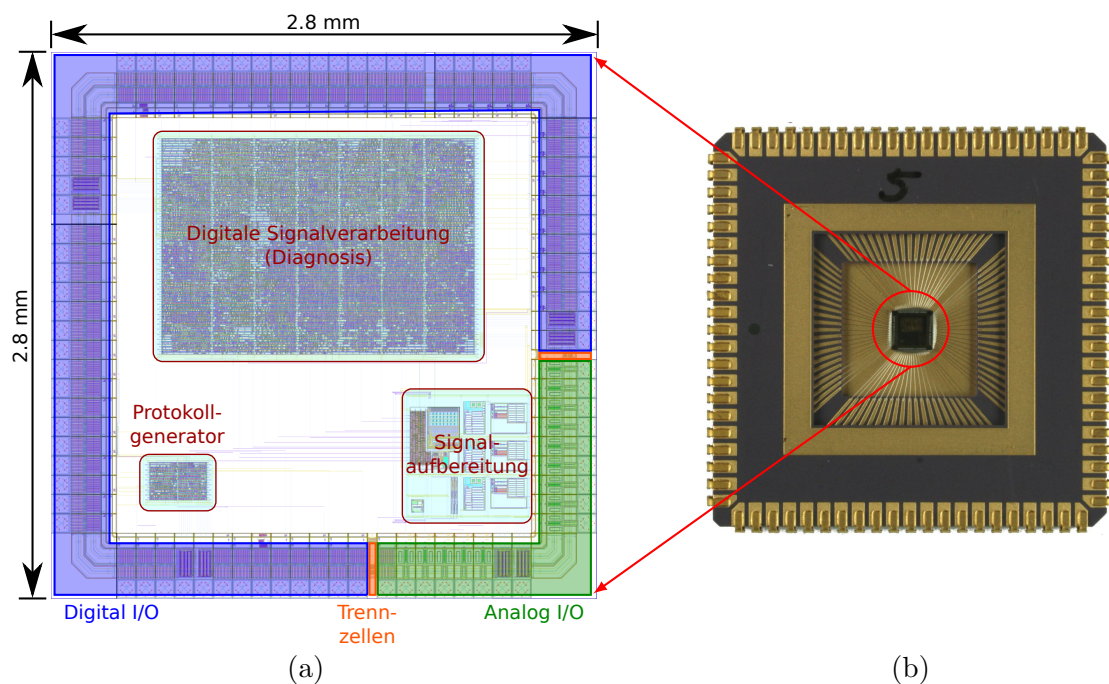


Abbildung 2.15: Gesamtlayout des ASIC (a) mit Protokoll-Generator (digital), Signalverarbeitung (digital) und Signalvorverarbeitung (analog) in separaten Modulen und Silizium-Chip (Die) im JLCC84 Gehäuse (b) [34]

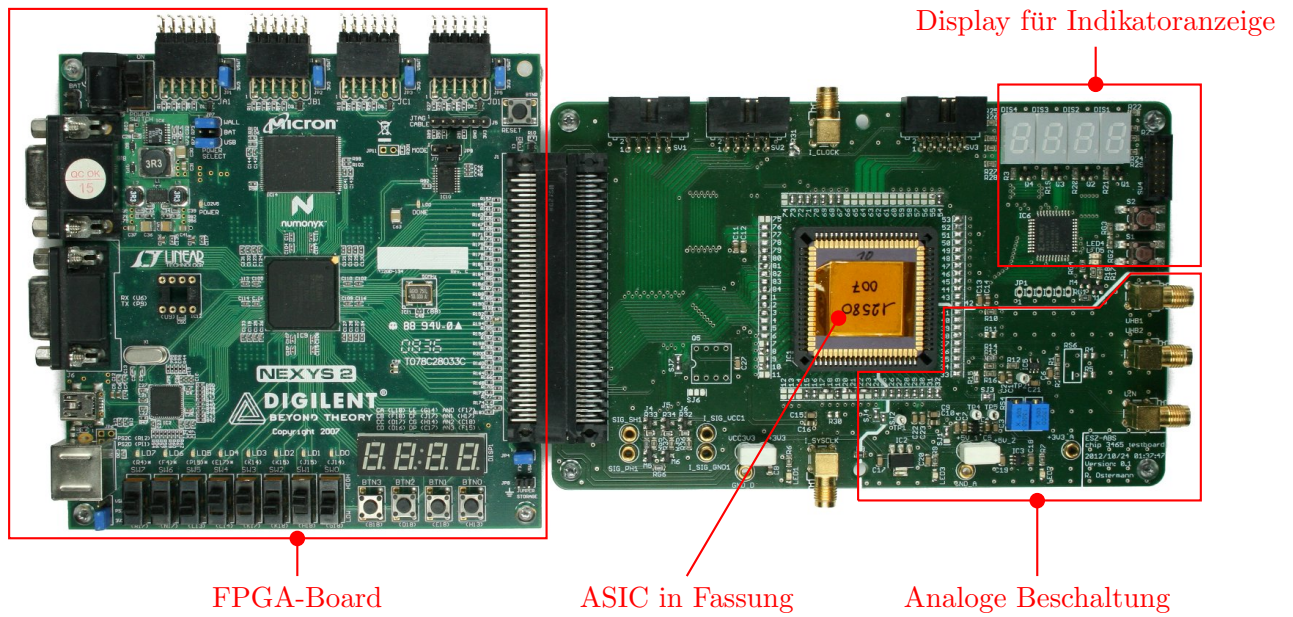


Abbildung 2.16: Testsystem für den ASIC, FPGA Board zur Kommunikation mit dem PC (links) und Platine mit ASIC und analoger Beschaltung (rechts)

	Analoge Signalaufbereitung	Digitale Signalverarbeitung	Protokollgenerator
Signal-Domäne	Mixed-Signal	Digital	Digital
Anzahl Standardzellen	Analog-Zellen: 1 × ADC 2 × Komparatoren 3 × Bias-Cells 3 × OPs 1 × Power-On-Reset	Sequentiell: 1906 Inverter: 700 Buffer: 13 Logik: 3803 Summe: <u>6422</u>	Sequentiell: 83 Inverter: 24 Logik: <u>169</u> Summe: <u>276</u>
Fläche	0,41 mm ²	1,93 mm ²	0,11 mm ²
Taktfrequenz	1 MHz für ADC	16 MHz	40 kHz
Gemessener Stromverbrauch	1 mA	0,42 mA/MHz	¡0,1 mA
Simulierter Stromverbrauch	1,05 mA ¹	0,38 mA/MHz ²	0,011 mA/KHz

Tabelle 1: Parameter der einzelnen Module auf dem ASIC

¹Die einzelnen Werte für die typische Stromaufnahme wurden aus den Datenblättern der Firma Austria-microsystems entnommen und aufaddiert.

²Die Stromaufnahme der Digitallogik des AD-Umsetzers ist nicht in der Simulation einbezogen.

2.1.5 Übersicht über Implementierungsexperimente

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Implementationen werden als Übersicht in Abbildung 2.17 dargestellt. In der dort dargestellten Variante (A) wird eine einfache offene Verarbeitung der aufgezeichneten Daten des Radmessplatzes auf einem PC mit Matlab durchgeführt. Dieses dient vor allem der Voruntersuchung und der Evaluation der Signalverarbeitungsalgorithmen.

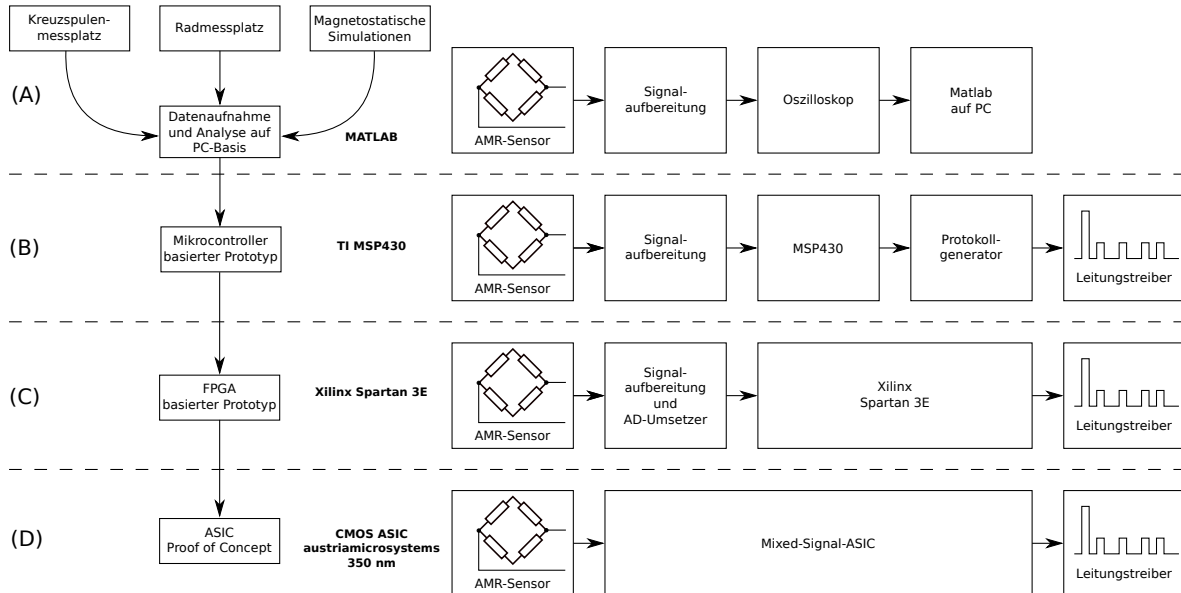


Abbildung 2.17: Übersicht über die unterschiedlichen Experimentalplattformen

Die Variante (B) zeigt eine Experimentalplattform auf Basis eines Mikrocontrollers. Der Protokollgenerator wird aufgrund des kritischen Zeitverhaltens auf einen zusätzlich Mikrocontroller implementiert. Als Vorverstärker für diese Experimentalplattform wurde im ersten Schritt ein konventionelles Verstärker-Modul nach Abschnitt 2.1.3 verwendet. In einer weiteren Ausbaustufe wird das Verstärker-Modul mit einem zusätzlichen Regelcontroller verwendet. In der Variante (C) wird an Stelle der Mikrocontroller ein leistungsfähiges FPGA eingesetzt. Die in der Programmiersprache C implementierten Algorithmen werden in VHDL umgesetzt. Auf diese Weise können die gesamte Signalverarbeitung und der Protokollgenerator in einem FPGA implementiert werden.

Die Verstärkermodule der Mikrocontroller-Variante (B) können hier wiederverwendet werden. Weil das eingesetzte FPGA über keine internen analogen Komponenten verfügt, ist ein zusätzliches Modul mit AD-Umsetzer und Komparatoren für diese Variante erforderlich. Der Entwurf eines Mixed-Signal-ASIC in Variante (D) wird in Abschnitt 2.1.4 vorgestellt. Dieser integriert analoge und digitale Komponenten. Somit werden auf einem Chip der direkte Anschluss des ASIC an den AMR-Sensor, die digitale Signalverarbeitung zur Bestimmung des Zustandsindikators und die Generierung des AK-Protokolls möglich. Dieser Chip kann ein Ausgangspunkt für Arbeiten in einem Folgeprojekt mit Ziel des Transfers für die Produktentwicklung sein.

Die folgende Tabelle 2 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der Parameter der einzelnen Implementationsvarianten.

Referenz	(A)	(B)	(C)	(D)
Implementierung	MATLAB	Mikrocontroller	FPGA	ASIC
Hardware	PC	MSP430	Spartan 3E	CMOS
Frequenz	N/A	5 MHz	12 MHz	12 MHz
Abtastung	offline	Unterabtastung	Vollabtastung	Vollabtastung
Algorithmus	FFT	reduzierte DFT	reduzierte DFT	reduzierte DFT
Integrierbarkeit (Größe/ Performance)	nicht anwendbar	mittel	gering	hoch
Verfügbare Hardware- Performance	hoch - offline	niedrig	hoch	angepasst
Diagnose Updaterate	offline	on-the-fly (Update nach n Perioden)	on-the-fly (jede Periode)	on-the-fly (jede Periode)
Flexibilität	sehr hoch	hoch	mittel	gering
Entwicklungszeit	frühe Phase	schnell	mittel	lange
Serienrelevanz	nur Laboraufbau	mittlere Serien	Kleinserien	Großserien/ Au- tomotive

Tabelle 2: Übersicht über die Implementierungsvarianten

2.2 Magnetische Charakterisierung mit Kreuzspulen-Messplatz

In der Diplomarbeit Siebenmorgen [36] wurde das erste Versuchsmuster des Kreuzspulen-Messplatz, besteht aus Prozessoransteuerung / PC-Schnittstelle, Verstärker und Positionierstativ und drei Spulenkästen entwickelt.

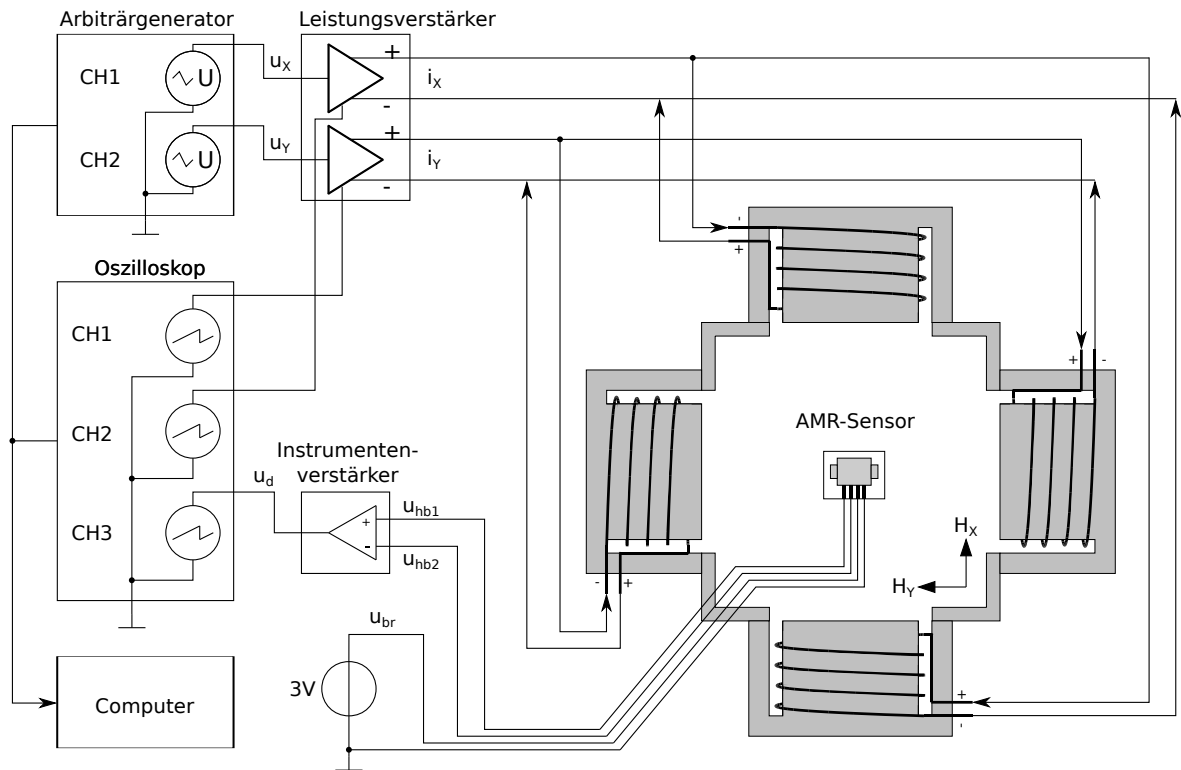


Abbildung 2.18: Blockschaltbild des Kreuzspulenmessplatzes

Die Abbildung 2.18 zeigt ein Blockschaltbild. Die Abbildung 2.19 und die Abbildung 2.20 zeigen Gesamtansichten des Kreuzspulen-Messplatzes. Die Verstärker und die Prozessoransteuerung sind als Eigenentwicklungen entstanden, auch das Stativ und Spulenkästen sind Eigenbauten. Sie nutzen zwei handelsübliche manuelle Kreuztische zur Positionierung in den drei Dimensionen. Der große Parameterbereich wurde - im Gegensatz zu ähnlichen Messeinrichtungen in der Industrie - nicht durch ein sehr aufwändiges Spulen-System abgedeckt. Günstiger war die Auslegung von drei Spulensystemen (Spulenkästen) jeweils für kleine, mittlere und große Feldstärken, die im Bereich des Sensors relevant sind. In späteren Versionen des Messplatzes wurden schrittmotorgesteuerte Kreuztische und ein Drehtisch eingesetzt, um eine Sensorzentrierung zu automatisieren.

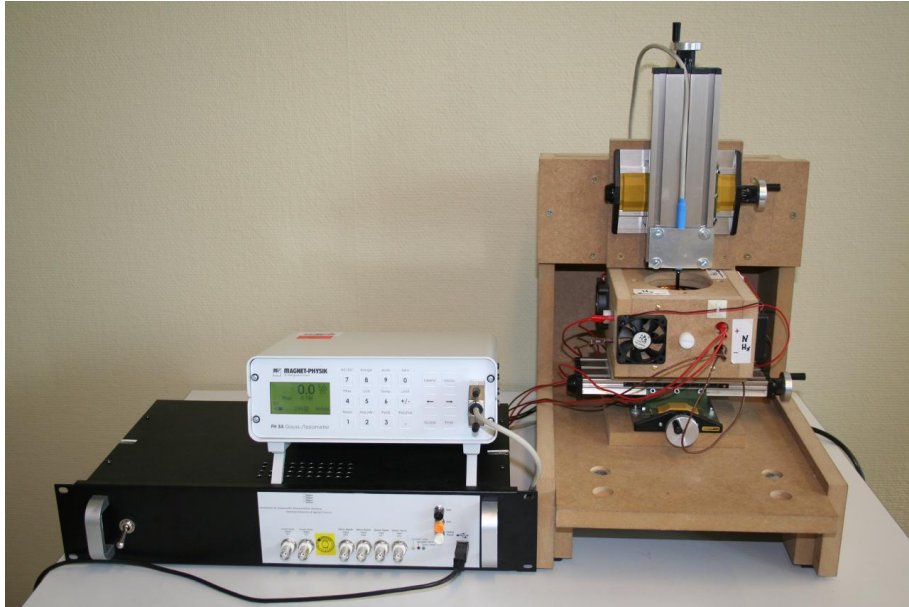


Abbildung 2.19: Kreuzspulenmessplatz (rechts) mit Leistungsendstufe (links unten) und Gaussmeter (links oben) zur Kompensationsmessung

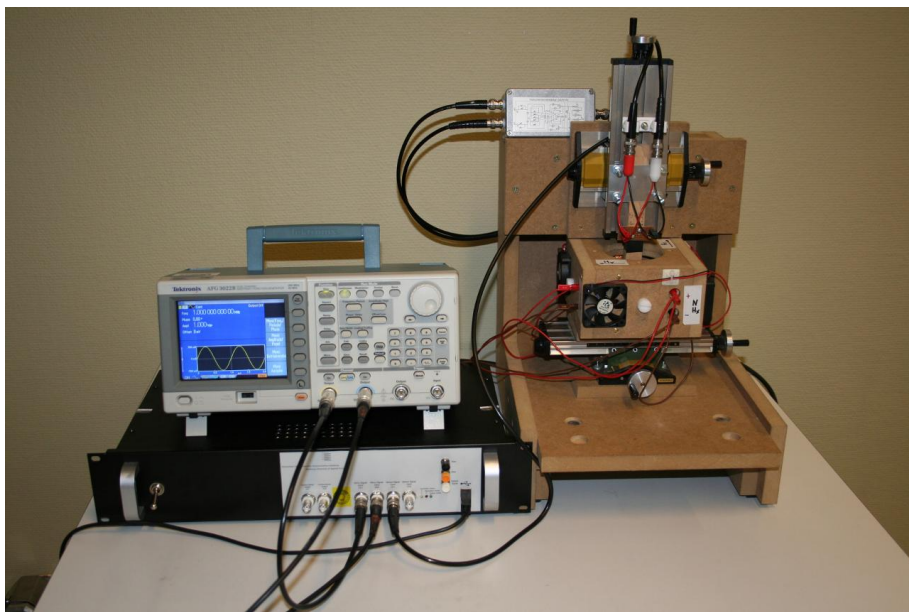


Abbildung 2.20: Kreuzspulenmessplatz (rechts) mit Leistungsendstufe (links unten) und Funktionsgenerator (links oben) zur Ermittlung des Kennfeldes des AMR-Sensors

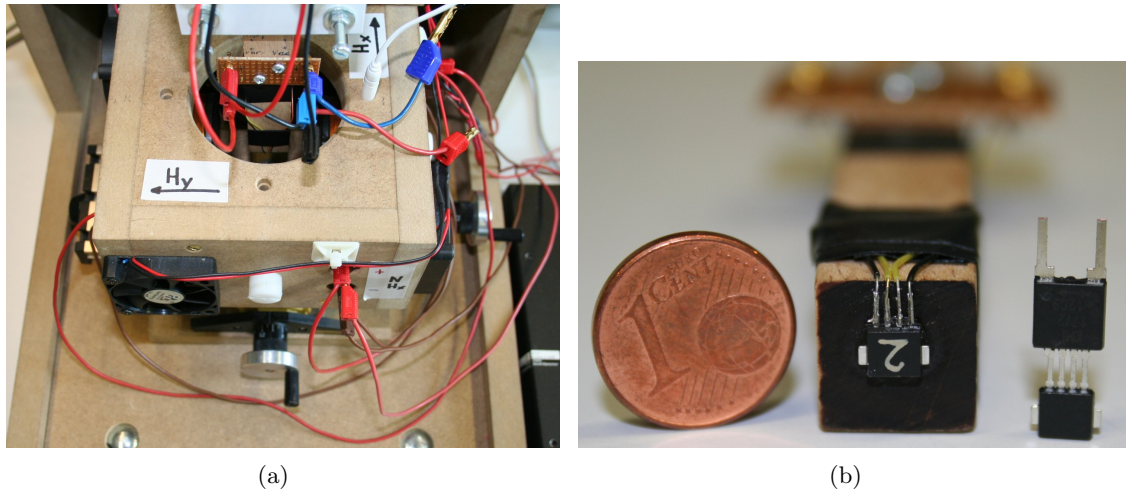


Abbildung 2.21: Blick in das Kreuzspulensystem (a) und AMR-Sensorkopf an Haltevorrichtung und vollständiger ABS-Sensor (b)

Das beschaffte Gaussmeter ist zur Ermittlung der Spulenfaktoren der Komponenten H_x und H_y verwendet worden (Abbildung 2.19). Damit kann der Strom für die gewünschte Feldstärke in der H_x - und H_y -Komponente eingestellt werden. Diese Feldstärke wirkt auf den an einem zentralen Stab befestigten Sensorkopf ein, der zentral in den Kreuzspulenkasten eingebracht wird (21(b) und 21(a)).

Auf Grund der recht kleinen Dimensionen der Brücke (weniger als $1,5 \times 1,5 \text{ mm}$) wird für diesen kleinen Bereich ausreichend genäherte Homogenität angenommen. Das ist durch Feldsimulation überprüft worden.

Die Vorgabe der Spulenströme erfolgt durch einen eingebauten Mikrocontroller oder durch einen Funktionsgenerator (Abbildung 2.20). Werden die Spulenströme nach vorgegebenen Trajektorien durchgeföhren, erhält man ein Kennfeld. Das Kennfeld kann mehrere Millionen Messungen umfassen und wird durch die entwickelte Software auf dem PC als Datensatz automatisch erzeugt.

Die Erprobung des Kreuzspulennessplatzes ist begleitend zur Softwareentwicklung erfolgt. Erste Probleme durch eine Erwärmung der Spulen und des Sensors wurden durch zusätzliche Lüfterkühlung und Temperaturüberwachung überwunden.

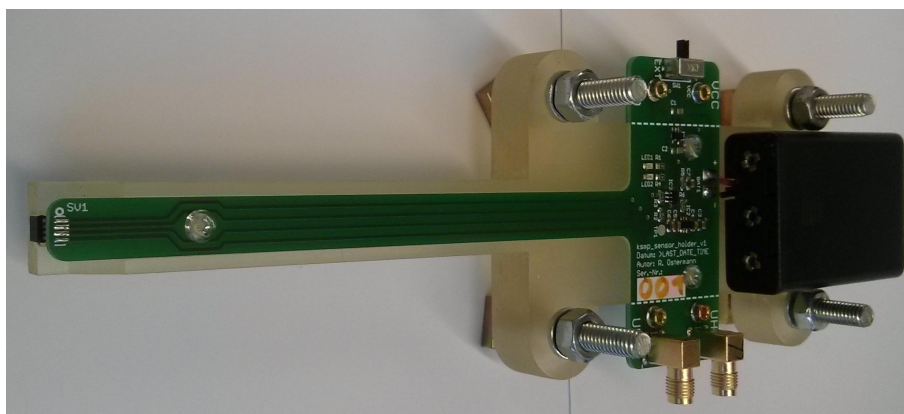


Abbildung 2.22: In Rapid Prototyping endgültig erstellte Fassung für den Sensorkopf im Kreuzspulennessplatz, links Sensorkopf mit Messbrücke, rechts Brückenversorgungselektronik

2.2.1 Errechnung des Sensorkennfeldes

Das gemessene Kennfeld des AMR-Sensors ist in Abbildung 2.23 (Mitte) dargestellt. Die Ausgangsspannung U_d ist in der Farbe codiert. Auf der linken und rechten Seite sind exemplarisch aus dem Kennfeld extrahierte Kennlinien dargestellt. Die Extraktion wurde für ein konstantes H_X durchgeführt. In jeder der extrahierten Kennlinien ist der lineare Bereich deutlich zu erkennen. Mit ansteigender Feldstärke H_Y gelangt man in einen nichtlinearen Bereich, wo die Ausgangsspannung nicht in Sättigung geht, sondern wieder abfällt. Entsprechendes gilt auch für negative Feldstärken von H_Y . Die Kurven sind im Idealfall punktsymmetrisch im Ursprung. Weiterhin ist zu erkennen, dass mit steigendem H_X der Gradient im linearen Bereich kleiner wird. Die Empfindlichkeit des AMR-Sensors wird somit kleiner je größer das H_X Feld wird.

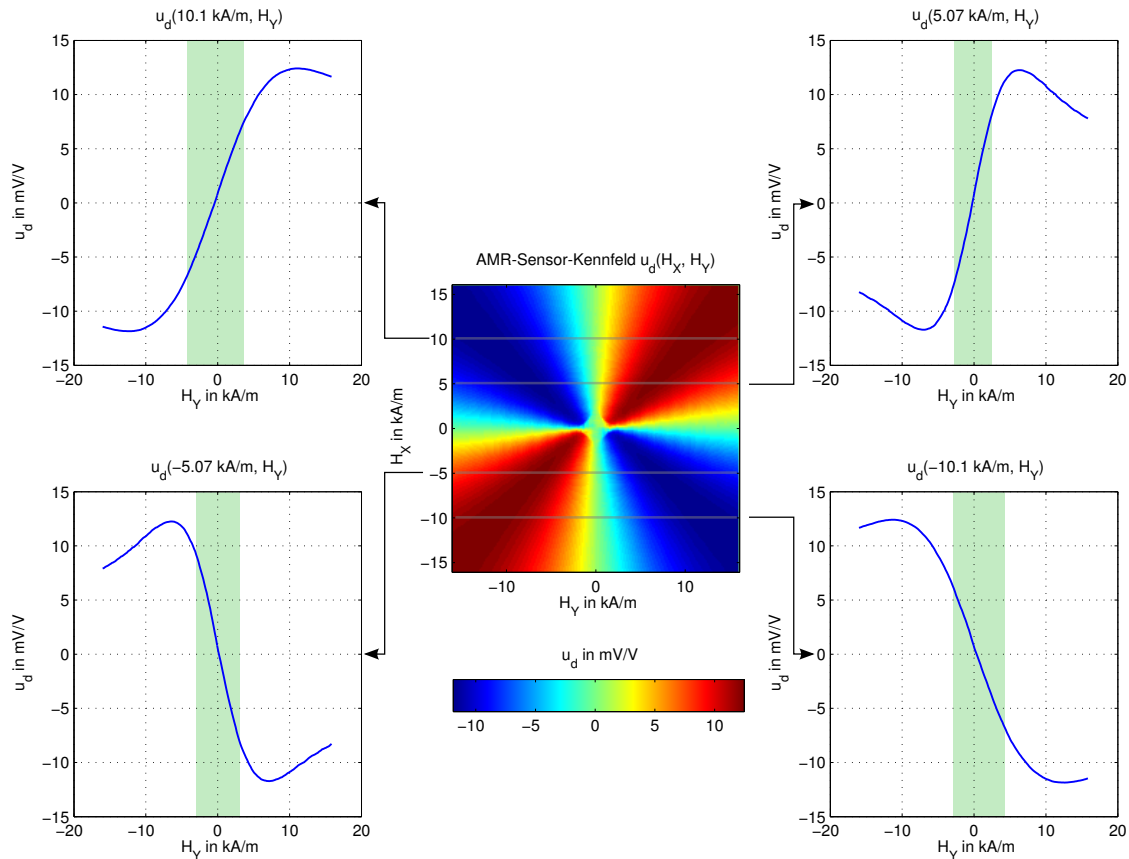


Abbildung 2.23: Kennfeld des AMR-Sensors

Der Stützmagnet liefert ein definiertes H_X -Feld. Das in Abbildung 2.23 dargestellte Kennfeld wurde ohne montierten Stützmagnet aufgenommen. Die Sensorcharakterisierung kann aufgrund der großen Feldstärken der Kreuzspulenanordnung auch mit montierten Stützmagneten durchgeführt werden. Ein solches Kennfeld ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Grundsätzlich bewirkt der Stützmagnet je nach Magnetisierung eine Verschiebung des Kennfeldes in der H_X - H_Y -Ebene. Magnetisierungen in Richtung der H_Z -Komponente werden nicht erkannt, weil der AMR-Sensor auf diese Komponente nicht sensitiv ist. Im Anwendungsfall ist nur eine Magnetisierung des Stützmagnetes mit einer H_X - und H_Z -Komponente sinnvoll.

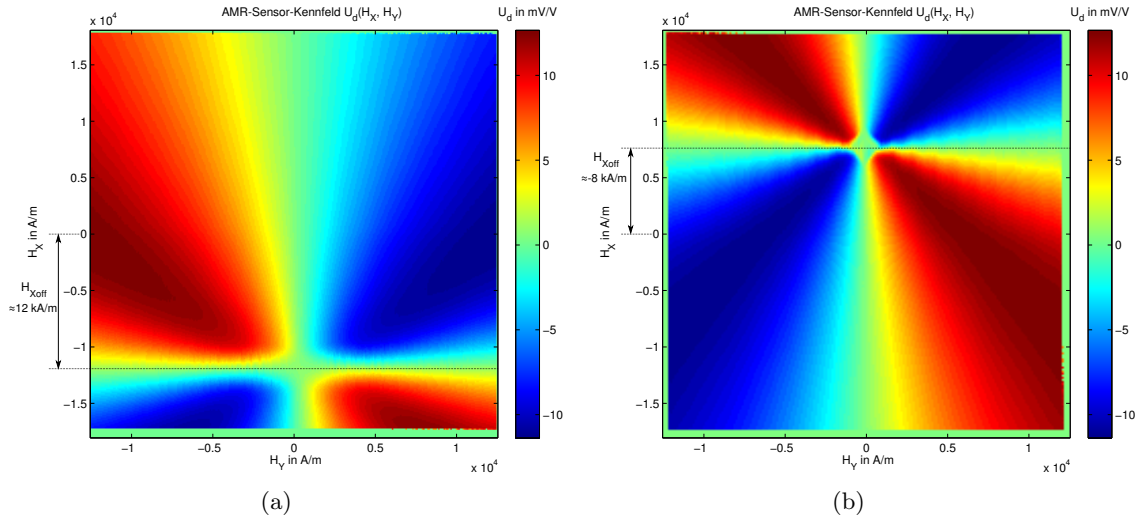


Abbildung 2.24: Gemessene Kennfelder von AMR-Sensoren mit montiertem Stütz magnet. Das Kennfeld (a) stammt von einem Sensor für passive Encoder (KMI22/1 [27]). Das Kennfeld eines Sensors für aktive Encoder (KMI18/2 [26]) ist in (b) dargestellt. Das magnetische H_X -Offset ($H_{X,off}$), welches durch das Stützfeld verursacht wird, kann einfach aus dem Kennfeld durch Auswertung der Nulldurchgänge (grün) abgelesen werden.

Beispielsweise verfügt im dargestellten Fall in der Abbildung 24(a) der Stütz magnet über eine Magnetisierung mit einer H_X -Komponente. Im Vergleich zum Kennfeld aus Abbildung 2.23 ist der Mittelpunkt zu einer H_X Feldstärke von ca. -12 kA/m verschoben. Somit bewirkt der bei der Sensorcharakterisierung montierte Stütz magnet ein Offset von $H_{X,off} \approx 12$ kA/m auf den AMR-Sensor. In der Abbildung 24(b) ist die Magnetisierung der H_X -Komponente mit $H_{X,off} \approx -8$ kA/m betragsmäßig kleiner und auch in entgegengesetzter Richtung erfolgt.

2.2.2 Berechnung eines analytischen Kennfeldes

Die Firma NXP Semiconductors [23] hat ein neues Verfahren zur numerischen Lösung der Gleichung 1 für die Bestimmung der internen Magnetisierung entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses Verfahren genutzt, um ein analytisches Sensorkennfeld zu errechnen. Das Verfahren nutzt die aus Dibbern [5] bekannte Formel zur Bestimmung der internen Magnetisierung:

$$\sin \varphi = \frac{H_Y}{H_0 + \frac{H_X}{\cos \varphi}} \quad (1)$$

Die Lösung dieser Gleichung nach α zur Bestimmung der internen Magnetisierung ist nur mit einem iterativen numerischen Verfahren möglich. Deshalb wird die Gleichung 1 zu

$$\min \left\| \frac{H_Y}{H_0 + \frac{H_X}{\cos \varphi}} - \sin \varphi \right\| \quad (2)$$

umgestellt und das Newton-Raphson-Verfahren mit einem Startwert von

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{H_Y}{H_X} \right) \quad (3)$$

angewandt. Das Ergebnis liefert den Winkel α der internen Magnetisierung \vec{M} des Permalloys.

Mit diesem Winkel kann mit

$$R(\theta) = R_{\perp} + \Delta R \cdot \cos^2\theta \quad (4)$$

der Widerstand jedes Brückenwiderstandes berechnet werden. R_{\perp} entspricht in dieser Formel dem Widerstand für $\theta = \varphi - \psi = 90^{\circ}$. Das ψ (typ. 45°) ist der Winkel zwischen der internen Magnetisierung \vec{M} und der durch die Barbarpolstruktur gedrehten Stromrichtung. Die maximale durch den magnetoresistiven Effekt hervorgerufene Widerstandsänderung ist durch ΔR angegeben. Die Abbildung 2.25 zeigt ein analytisches Kennfeld, welches mit Hilfe der Formeln 2 und 4 im Bereich von $\pm 16 \text{ kA/m}$ berechnet wurde.

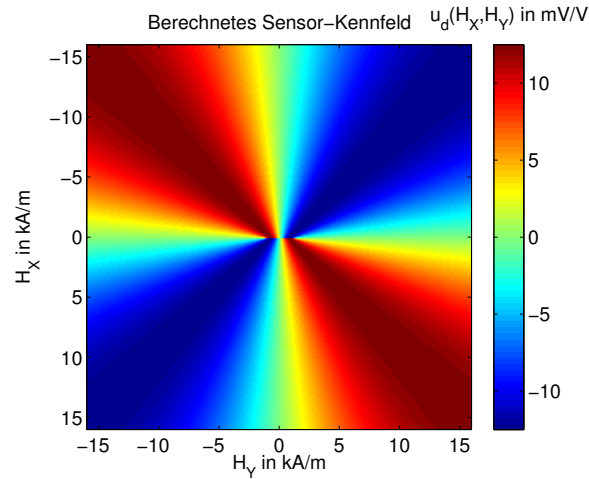


Abbildung 2.25: Analytisch berechnetes Kennfeld

2.2.3 Kreuzspulenmessplatz für große Feldstärken

Mit den ersten Versionen und den drei Kreuzspulenkästen für drei Feldstärkenbereiche wurde umfangreiches Datenmaterial messtechnisch erfasst. Ausgehend davon wurde noch ein Rechenmodell für die Simulation des Brückenverhaltens aufgestellt. Eine weitere Nutzung des Messplatzes ist außerdem zur Bestätigung der Modellvorstellungen vom Sensorverhalten durch den Vergleich von Simulation und Messung möglich.

Nach erfolgreicher Vermessung diverser Sensoren bot sich durch Industriekontakte die Gelegenheit, den Messplatz mit einem anderen Sensor (nicht mit Barberpol-Struktur) und Winkelsensoren zu erproben. Dabei sind Erweiterungen entstanden, die auch für die Sensoren in dem Vorhaben ESZ-ABS jetzt sinnvoll zur Verfügung stehen [29]. Im Rahmen der Erweiterungen entstand eine umkonstruierte Mechanik und in der Masterarbeit Zippel [39] wurde dieser Messplatz nochmals verbessert. Das wird in diesem Abschnitt dargestellt.

Die ersten Versionen der Kreuzspulenkästen lassen einen großen Messbereich der magnetischen Feldstärken zu, indem drei verschiedene Spulenkonstruktionen für drei Messbereiche genutzt worden sind. Jedoch ist dies bisher im Bereich großer Feldstärken nur durch einen geringen Abstand der Spulenkerns erzielt worden. Demzufolge ist eine stärkere Inhomogenität pro Volumeneinheit im Bereich des Freiraumes (Luftspalt), in den der Sensor eingebracht wird, gegeben. Diese Inhomogenität wurde mit einer unter den Spulenkasten aufgebauten X-Y-Verfahrenseinheit und einem Schrittmotor gesteuerten Drehteller messtechnisch bestimmt. Als erste Maßnahme wurde der Sensor automatisiert an den Punkt mit dem geringsten und mit weitgehend punktsymmetrischen Einfluss vom Schrittmotorsystem positioniert. Dennoch war als Ergebnis im Bereich hoher Feldstärken ein Inhomogenitätsfehler im niedrigen Prozentbereich unvermeidlich.

Um diesen Fehler zu minimieren, wurde im Rahmen der Masterarbeit Zippel [39] ein neuer, wesentlich größerer Kreuzspulenkasten konstruiert und erfolgreich erprobt. Es gelang zunächst Feldstärken zu realisieren, die die bisherigen Werte verdoppeln (Dauerbetrieb/Lüfterkühlung bis 80 kA/m). Vorallem aber wurde der zentrale Freiraum (Luftspalt) zwischen den Spulenkernen erheblich vergrößert. Letzteres bewirkt eine deutlich geringere Inhomogenität pro Volumeneinheit. Der Bereich des Freiraumes zwischen den Spulen und der geometrischen Dimension des Sensors liegt zwei Größenordnungen auseinander. Somit wirken sich unvermeidbare Inhomogenitäten wesentlich geringer (etwa ein Prozent oder weniger) aus. Diese Untersuchung wurde durch Simulationen mit dem 3D-Simulationswerkzeug der Firma CST Darmstadt durchgeführt und zeigte gute Übereinstimmungen mit dem später vermessenen Spulenkasten.

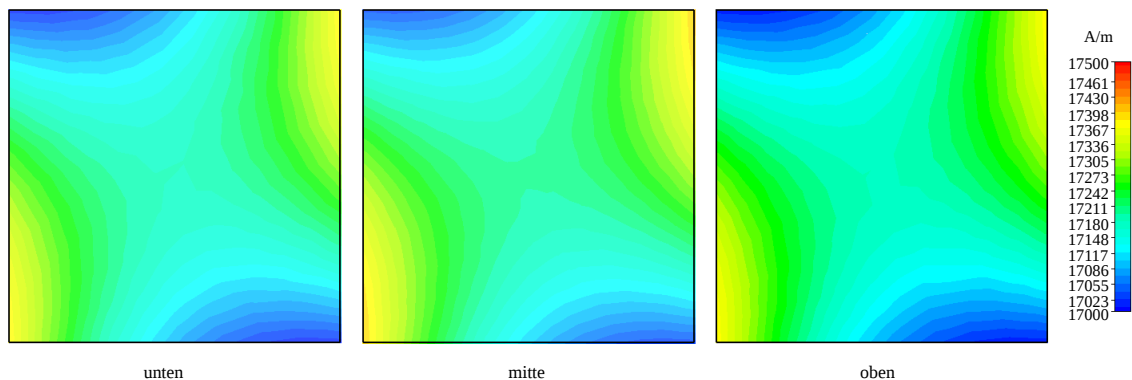


Abbildung 2.26: Magnetostatische Simulation zur Voruntersuchung der Homogenität im Zentrum ($3 \times 3 \times 3$ mm) des neuen Kreuzspulenkastens KSMP2 [39]

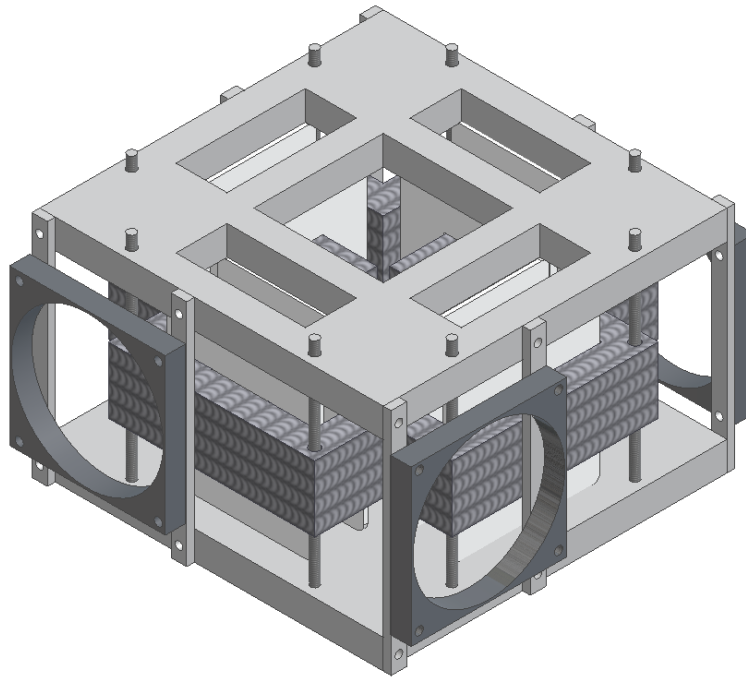


Abbildung 2.27: Kreuzspulenkasten KSMP2 für große Feldstärken als 3D-Modell [39]

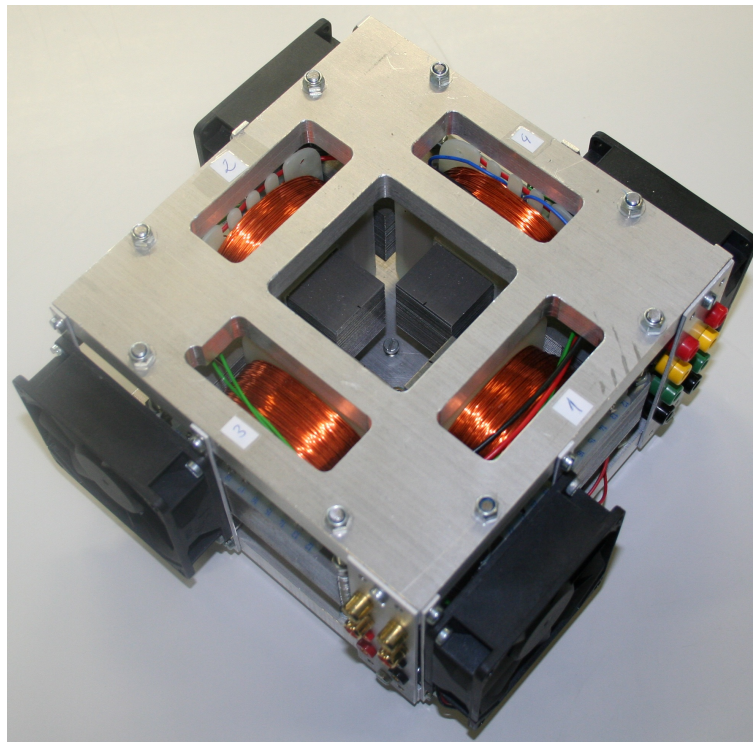


Abbildung 2.28: Kreuzspulenkasten KSMP2 für große Feldstärken [39]

2.3 Radmessplatz für die Erfassung des Encoder-Sensor-Systems

2.3.1 Radmessplatz: Erstes Vormuster RMP1

Für das Arbeitspaket AP3 (Radmessplatz) waren die konzeptionellen Unsicherheiten anfangs erheblich. Daher wurde für eine schrittweise Abfolge der Arbeiten mit mehreren Vormustern entschieden. Zunächst wurde ein Seriensensor zwischen Brücke und Signalverarbeitung-ASIC aufgetrennt und auf einer dafür angefertigten Platine fixiert. Der Sensor ist dadurch gut reproduzierbar montierbar und die Brückensignale wurden damit auf SMA-Koaxialleitungen zugänglich. Der Aufbau und Positionierung zum Encoder sind in Abbildung 2.29 und Abbildung 2.31 gezeigt.

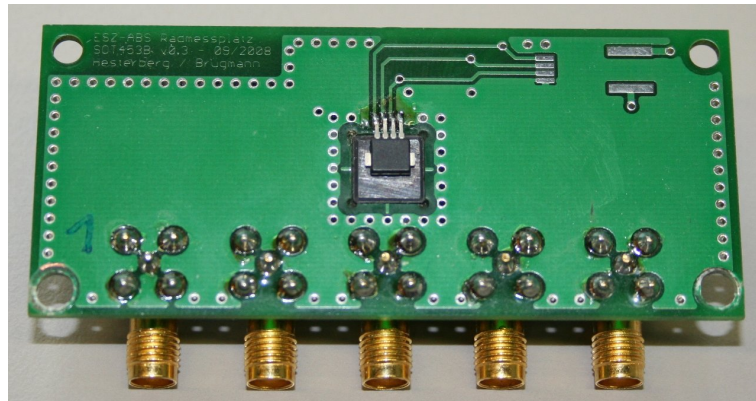


Abbildung 2.29: Sensorplatine zur Aufnahme des AMR-Sensorkopfes für den Radmessplatz

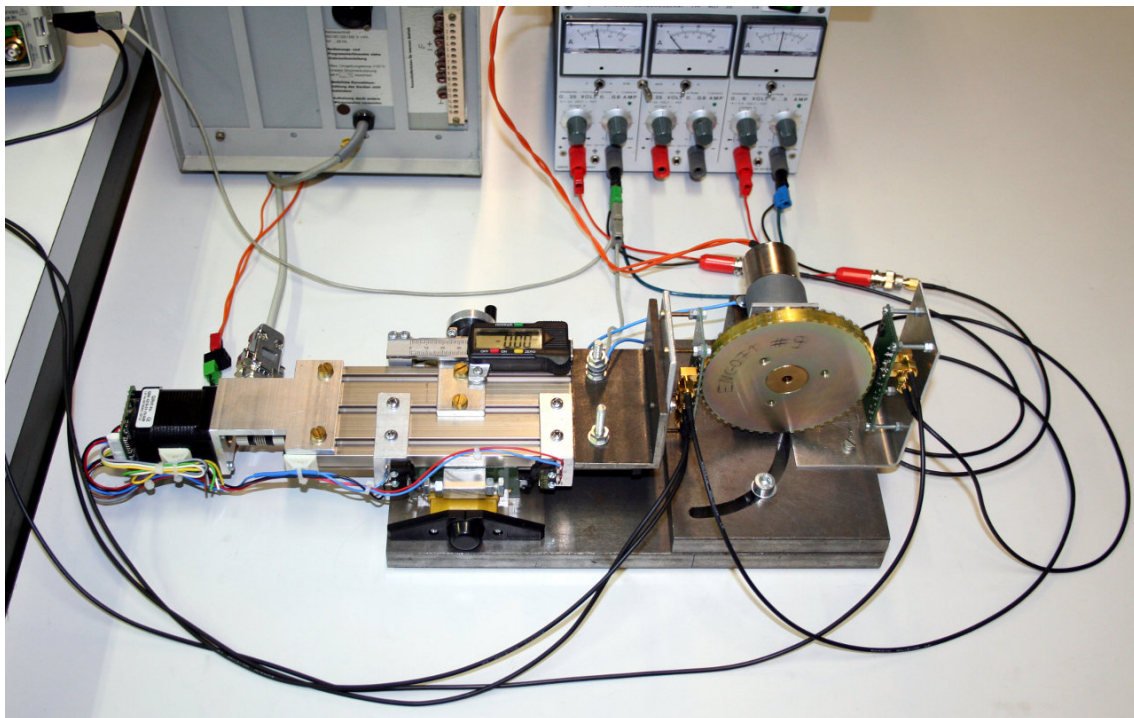


Abbildung 2.30: Erstes Vormuster des Radmessplatzes (RMP1)

Es war notwendig, für erste Erkenntnisse schnell ein Sensor-Encodersystem für die Signallieferung verfügbar zu haben. Damit konnten sich die Teammitglieder mit dem Sensorsystem vertraut machen. Diese Vorab-Signalquelle wurde auch für die anderen Arbeitspakete benötigt.

Es entstand das erste Vormuster mit einem passiven Encoder, siehe Abbildung 2.30. Die vorgezogenen Vormuster haben eingeschränkte Präzisionsanforderungen, sind jedoch weit weniger aufwändig. Ein umgesetzter Entwicklungsschritt war die Nachrüstung von zunächst handbedienten Kreuztischen, welche bei einigen Achsen mit Schrittmotoren automatisiert wurden. Die Tabelle 3 vergleicht die Vormuster und das endgültige Laborsystem des Radmessplatzes.

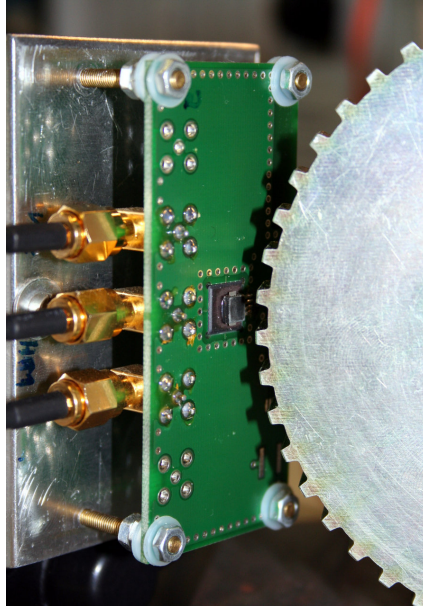


Abbildung 2.31: Detailaufnahme der montierten Sensorplatine

2.4 Radmessplatz: Zweites Vormuster RMP2

Die Analyse der manuell einstellbaren Verkippungsachsen am RMP1 haben gezeigt, dass diese einen starken Einfluss auf das Sensorsignal haben. Besonders die Verkippung um die φ_y -Achse und die Verschiebung auf der x -Achse führt zu starken Verzerrungen. Zur weiteren Untersuchung dieser kritischen Fehlpositionierungen wurde in der studentischen Arbeit [37] der neue Messplatz RMP2 mit drei Linearachsen und einer Verkippungsachse entwickelt und aufgebaut. Dargestellt ist dieser Messplatz in Abbildung 2.32.

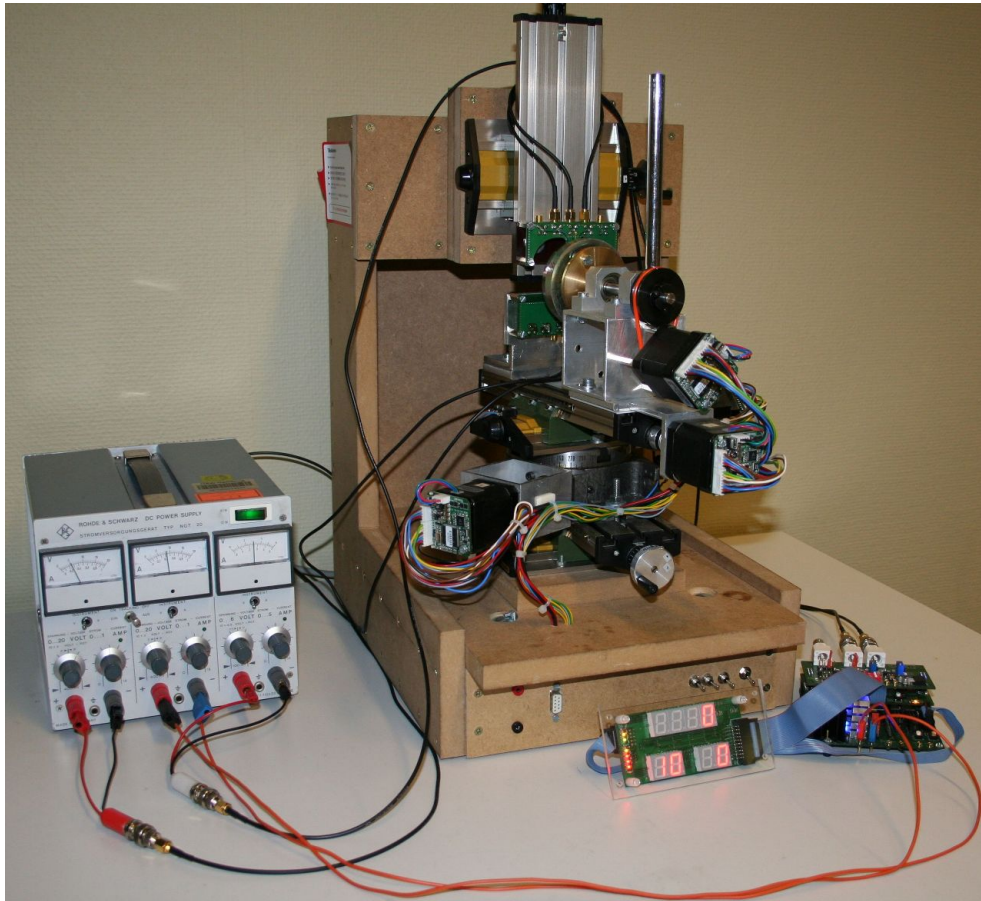


Abbildung 2.32: Zweites Vormuster des Radmessplatzes (RMP2)

Die automatisierten Achsen werden mit Schrittmotoren bewegt. Diese können wiederum direkt vom PC gesteuert werden.

Die schnelle Verfügbarkeit dieses weiteren Vormusters hatte den Vorteil, dass die anderen Arbeiten bereits die Vormuster der Messaufbauten nutzen können, ohne auf die Verfügbarkeit des letzten Labormusters angewiesen zu sein.

2.4.1 Radmessplatz: Laborsystem RMP3

Das endgültige Laborsystem RMP3 wurde im Rahmen der studentischen Arbeit [35] geplant, konstruiert und aufgebaut. Eine Konstruktionszeichnung vom Gesamtaufbau ist in Abbildung 2.33 dargestellt.

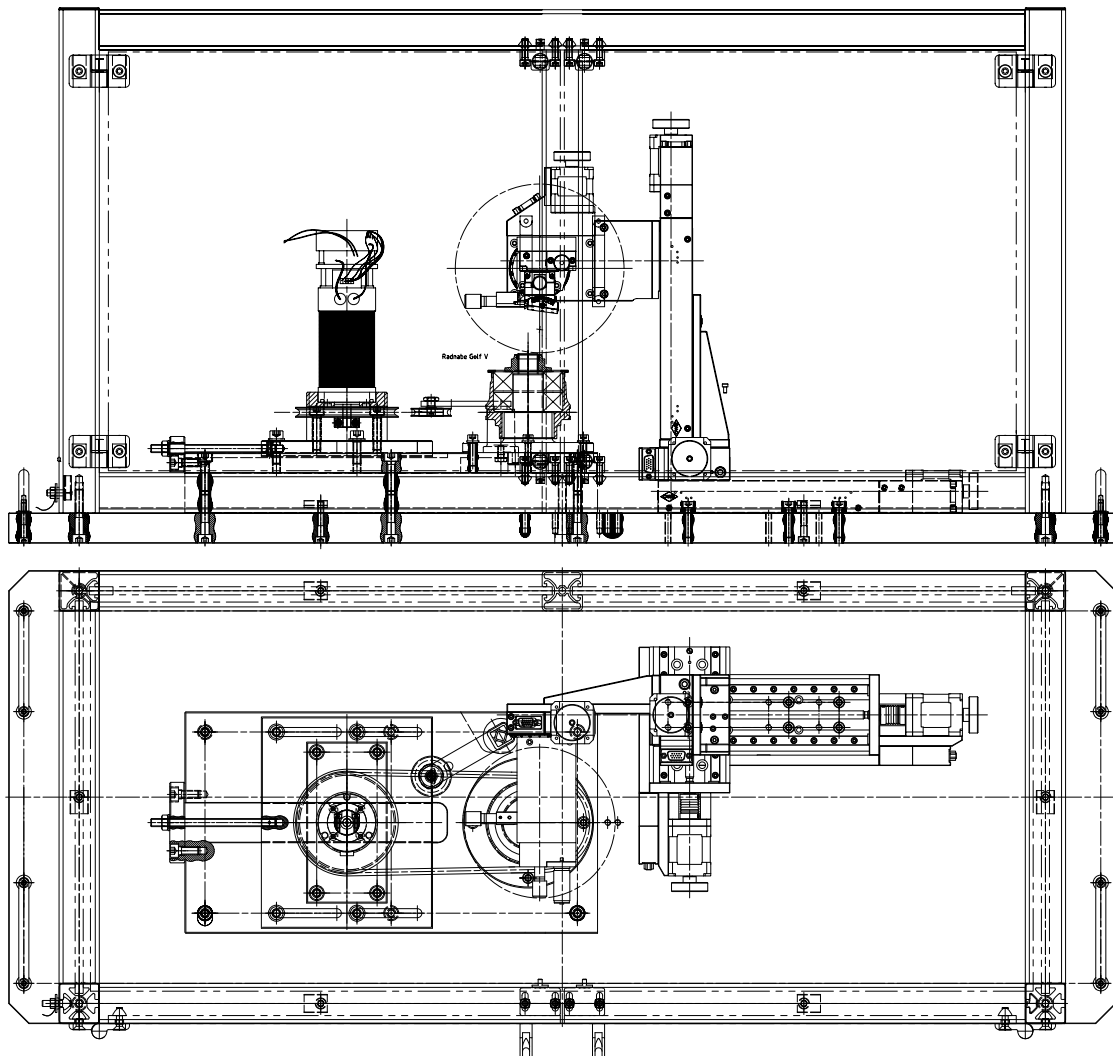


Abbildung 2.33: Zeichnung des Laborsystems des Radmessplatzes (RMP3)

Den Aufbau aus schrittmotorgesteuerten Linearachsen, Drehtischen und Goniometern zeigt die Abbildung 2.38. Diese Konstruktion basiert auf Vorarbeiten mit einfacheren Radmessplätzen (RMP1 und RMP2). Das Positioniersystem des Messplatzes verfügt über sieben Freiheitsgrade, bestehend aus drei Verfahrachsen, drei Verkippungsachsen und einer zusätzlichen Verschwenkeinheit zur Umkonfiguration zwischen radialer bzw. axialer Encodereinheit.

Der entwickelte Messplatz besteht aus zwei Modulen, dem Antriebsmodul und dem Messmodul. Das Antriebsmodul, welches in Abbildung 2.36 dargestellt ist, beinhaltet eine Radnabeneinheit und einen Motorblock. Derzeit existieren drei Radnabeneinheiten. Sie nutzen Serienencoder aus verschiedenen Automobilbaureihen (Volkswagen Golf IV/V sowie BMW 3er). Es wurden Encodersysteme mit passiven und magnetisch aktiven Encodertypen ausgewählt. Der Radmessplatz erreicht eine Wiederholgenauigkeit von unter $15\mu\text{m}$ Mikrometern linear bzw. unter $0,2^\circ$ im Verkippwinkel. Damit ist die Zielstellung von Messkennfeldern von ca. $50 - 100\mu\text{m}$ Mikrometern lineare Auflösung und $0,5^\circ$ Schrittweiten der Verkippungen sehr sicher erreichbar.

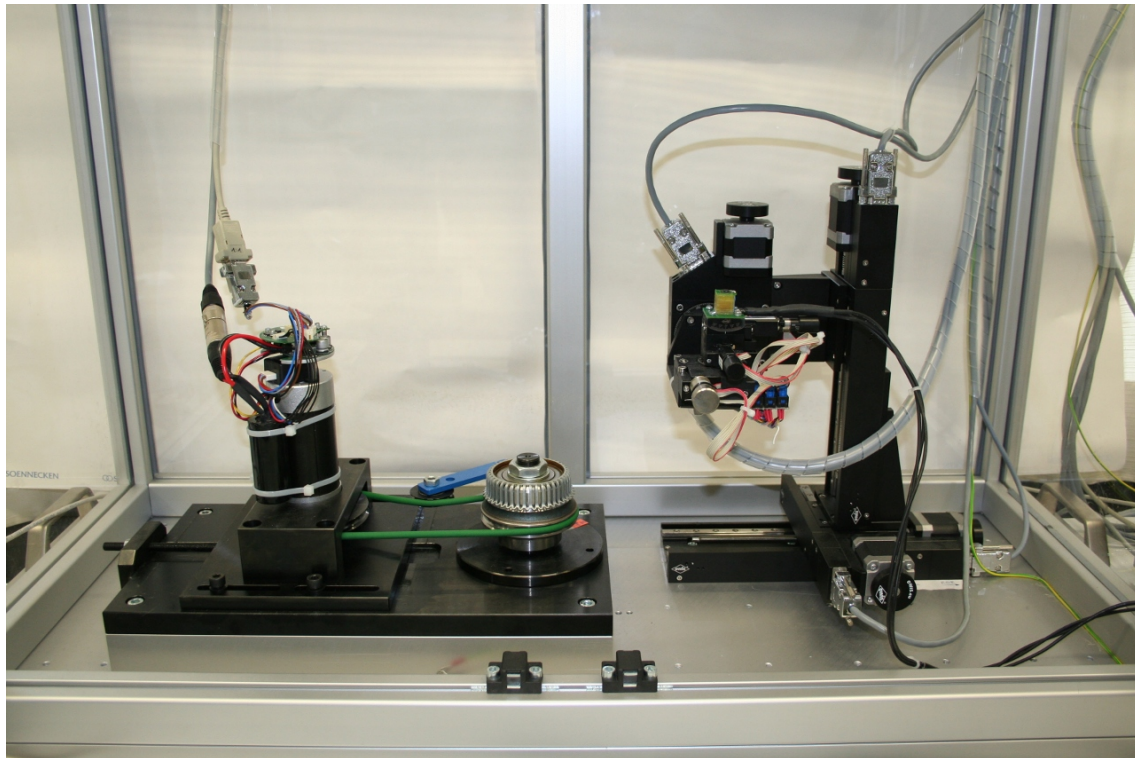


Abbildung 2.34: Laborsystem des Radmessplatzes (RMP3) in endgültiger Konfiguration
 Links: Antriebsmodul mit BLDC-Motor und wechselbarer Radnabeinheit
 Rechts: Messmodul mit montierter Sensorfassung und Positionierarm

Um den Radmessplatz zu steuern, wurde eine Ansteuerung der Schritt- bzw. BLDC-Motoren in Hardware aufgebaut und eine Steuerung und automatisierte Erfassung als leicht zu modifizierende Matlab-Scripte realisiert.

Eine weitere Diplomarbeit [9] widmet sich gegenwärtig der Sicherstellung des Betriebs durch eine unabhängige Kollisionserkennungs-Hardware und Notabschaltung. Dieses System verhindert eine Kollision und Beschädigung des empfindlichen und wertvollen Positioniersystems mit der schnelldrehenden Radnabe im Falle von Softwarefehlern oder sonstigen, seltenen Fehlerfällen. Insgesamt kann der Messplatz nun viele Stunden (typ. 8-36 Stunden je Versuchsreihe) kontinuierlich und automatisch Messwerte erfassen. Es wurde ein Messplan erstellt, der alle wichtigen Signalsituationen durch variable Positionierung des Sensors in den orthogonalen Ebenen erfassen kann.

Die bisherigen Ergebnisse sind in ihrer Aussagefähigkeit sehr zufriedenstellend und lassen auch eine differenzierte Bewertung der Sensor- und Encodertypen zu. Die erzeugten sehr dichten und präzisen Kennfelder sind mit großem Interesse von den Industrie-Experten des Projektpartners aufgenommen worden. Bisher gab es keine im Umfang vergleichbare Messdatenbasis. Es wurden umfangreiche Messungen mit aktiven und passiven Encoderrädern am Radmessplatz vorgenommen, sodass ein umfangreicher Datenbestand vorliegt. Die grafische Darstellung in farbigen Plotdarstellungen über Abstand und Verkipfung hat sich bewährt, um dieses Datenmaterial visuell anschaulich zu gestalten. Dazu wurden die entsprechenden Matlab-Steuerungs- und Auswerteskripte im Detail verbessert. Beispiele für die Messung Verkipfung der φ_y -Achse sind in Abbildung 2.43 dargestellt. Ebenso sind Beispiele für den Versatz des Sensors in der x -Achse in Abbildung 2.42 dargestellt.

Es wurde erkannt, dass die Steuerung bisher einen Nachteil aufweist. Bei vielstündigem Mess-

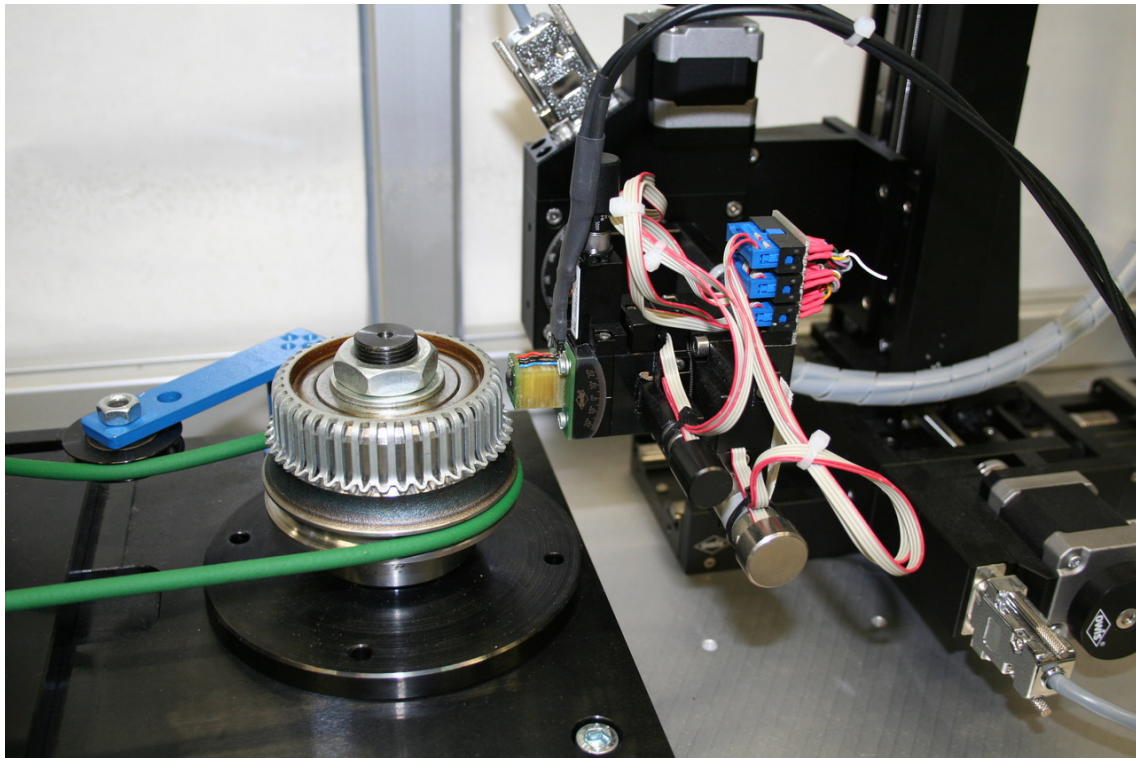


Abbildung 2.35: Detailansicht einer Messung mit Golf IV Encoderrad. Die Encoderräder, Sensoren und Antriebsmotoren sind modular umrüstbar.

betrieb bis zu 72 Stunden pro Messreihe, kann keine ununterbrochene Kontrolle durch den Bediener erfolgen. Im Falle von Softwarefehlern oder dem Absturz des Steuerungs-PC's ist somit nicht die manuelle Notabschaltung vollständig sicherzustellen. Zu diesem Zweck wurde eine separate automatische Notabschaltung eingebaut. Diese wird ausgelöst, wenn der Sensor im Fehlerfall so verfahren wird, dass es zu einer Berührung des schnell rotierenden Encoderrades kommt. Im Rahmen der Diplomarbeit Ivanov [9] wurde eine entsprechende Kollisionsdetektion entwickelt. Sie basiert auf einem Piezoelement, das auf die Sensorfassung eingebaut wurde. Eine getrennte Auswerteschaltung detektiert die Piezospaltung, die im Falle von Vibration oder Druck auf den Sensor auftritt. Mit der Auswerteschaltung werden die Schrittmotorsteuerungen und der Antriebsmotor des Encoders unmittelbar zum Stillstand gebracht. Diese Lösung sichert den Radmessplatz vor Beschädigung und erlaubt damit den automatischen Betrieb auch über lang andauernde Messreihen von mehreren Tagen. Eine weitere Aufgabenstellung ergab sich durch die Besonderheit, dass der Sensorhersteller kein Serienencoderrad sondern ein speziell gefertigtes Referenzencoderrad mit der Bezeichnung DN5 bzw. JT65 für die Vermessung und Spezifikation seiner Produkte verwendet. Hierfür konnte also keine Automobilradnabe umgearbeitet werden. Die vorausschauende Konstruktion des Radmessplatzes ermöglichte es, ein Aufnahmemodul für diese Encoderräder zu verwenden. Im Rahmen der Diplomarbeit L. Coulibaly [3] wurden die Lager- und Riemenscheiben konstruiert, gefertigt und erprobt, siehe Abbildung 2.37. Damit ist der unmittelbare Vergleich mit den Herstellerspezifikationen des Sensors möglich, ohne den Einfluss von abweichenden Serienteilen der Autohersteller zu berücksichtigen. Mit dem Radmessplatz ist andererseits die Erfassung von realen magnetischen Parametern aktiver Encoderräder möglich, für die bisher kaum genaue Messwerte vorlagen. Das wurde mit Hilfe des langsamen Schrittmotorantriebs und einer entsprechend fixierten Gaussmeter-Sonde im Rahmen der Masterarbeit Zippel [39] erfolgreich genutzt, um Ausgangspunkte für die simulative Nachbildung der Encoderräder zu erhalten.

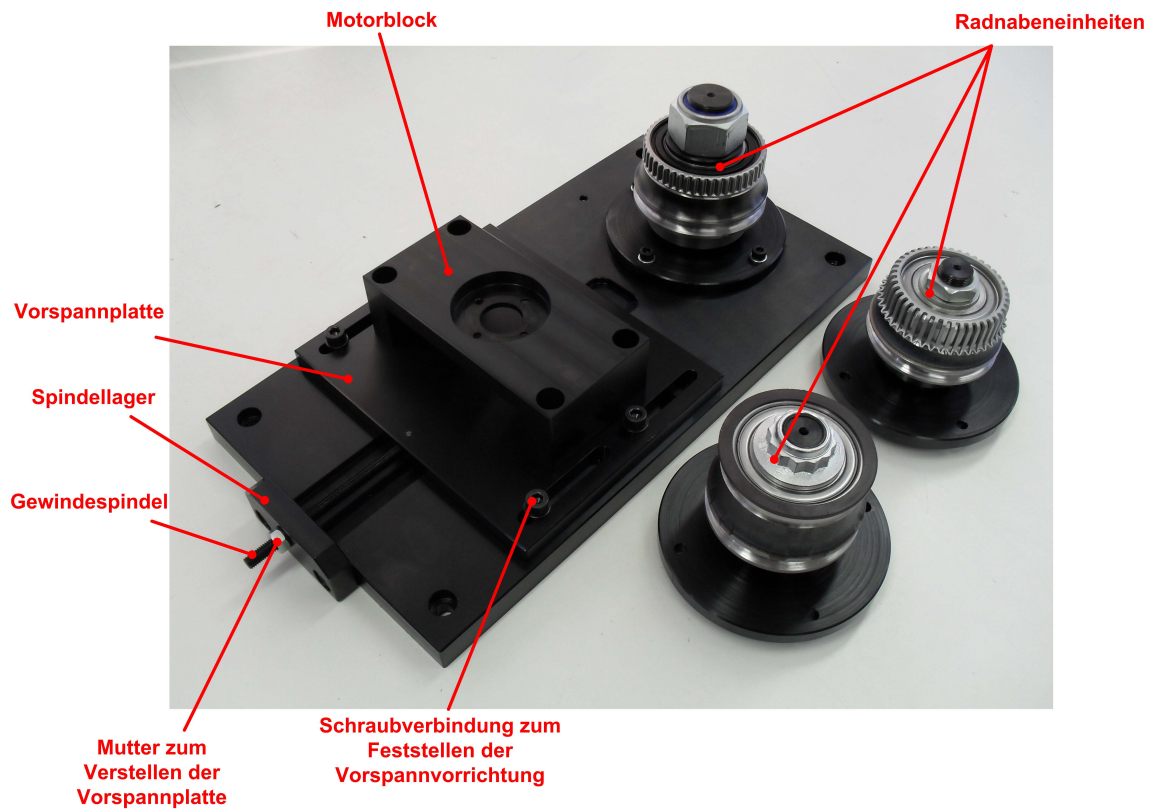


Abbildung 2.36: Antriebsmodul des Radmessplatzes mit drei Radnabeneinheiten mit Encodern verschiedener Automobilhersteller [35]

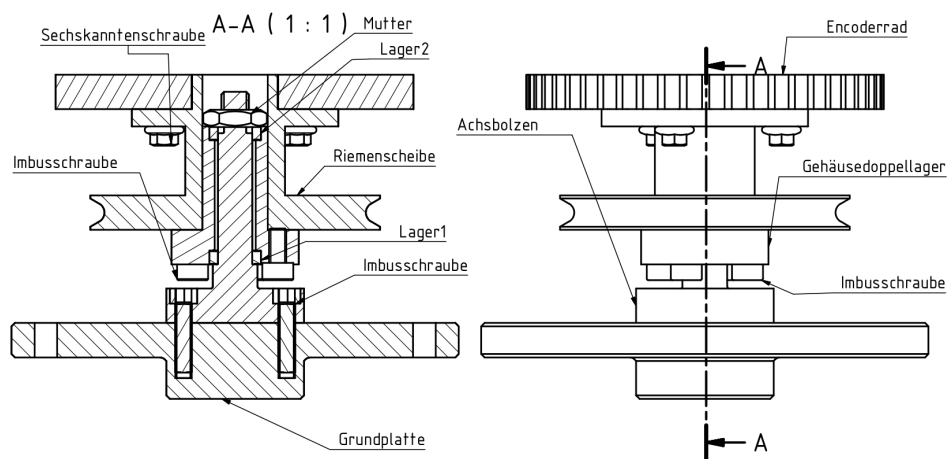


Abbildung 2.37: Zeichnung des Encodermoduls für DN5-Referenzencoder

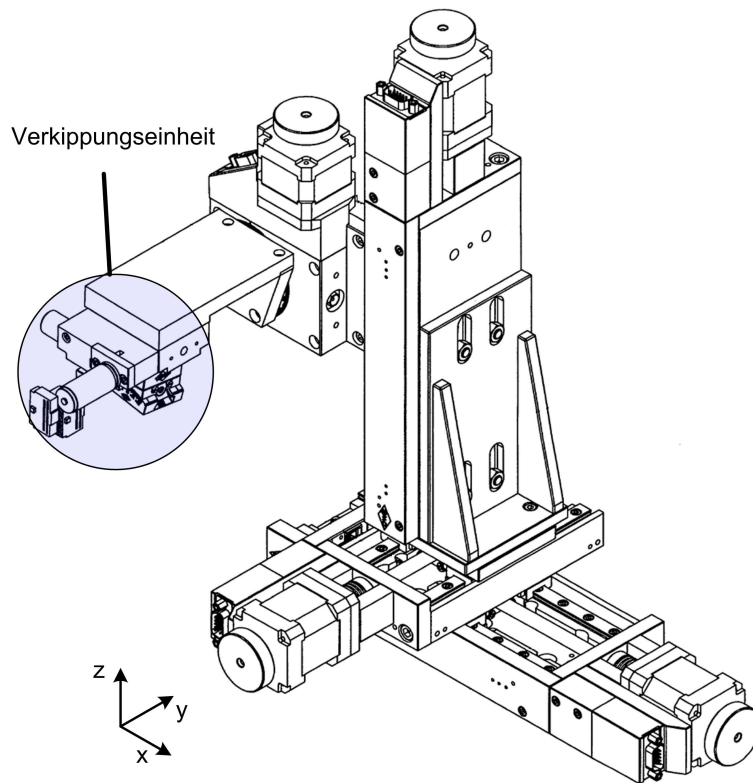


Abbildung 2.38: Das Messmodul des RMP3 [35] mit sieben Freiheitsgraden ermöglicht die Positionierung an radialen und axialen Encoder verschiedener Bautypen

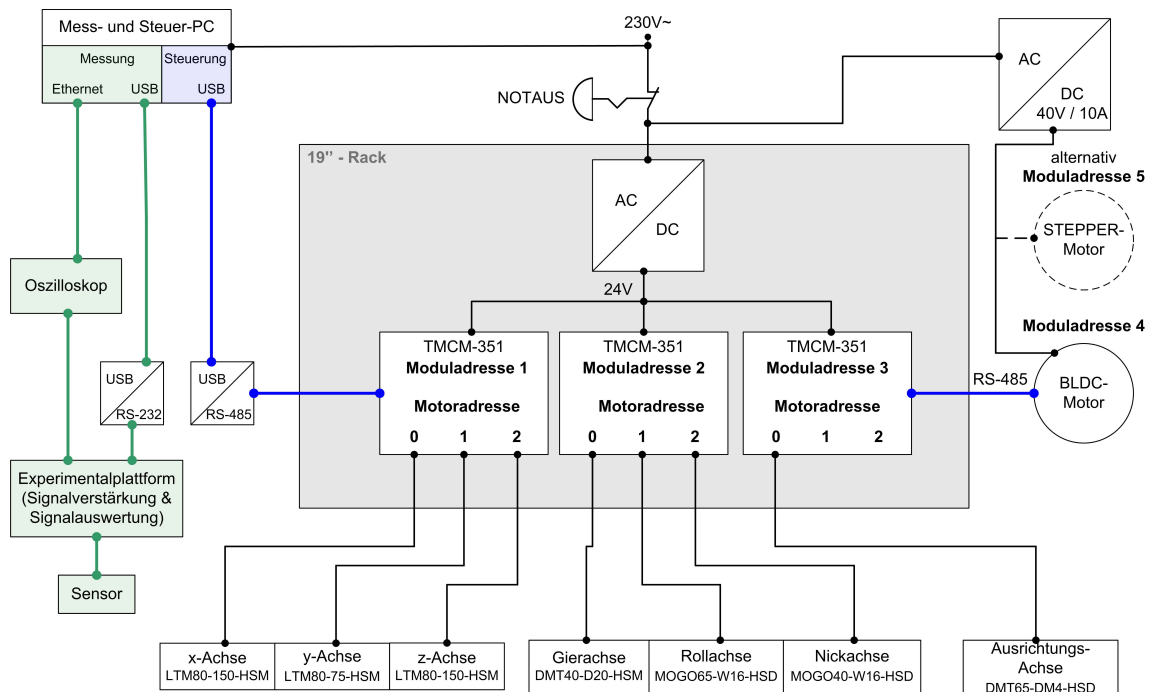


Abbildung 2.39: Die Steuerung des Radmessplatzes ermöglicht die vollautomatische Messdatenerfassung. Die Messgeometrie wird vom PC vorgegeben und an die Motorsteuerungen übertragen. Die Daten werden von der Experimentalplattform erfasst und am PC archiviert und ausgewertet [35].



Abbildung 2.40: Das Steuermodul des Radmessplatzes RMP3 kontrolliert sieben Schrittmotoren und einen Antriebsmotor, der wahlweise als Schritt- oder BLDC-Motor montiert werden kann [35, 9].

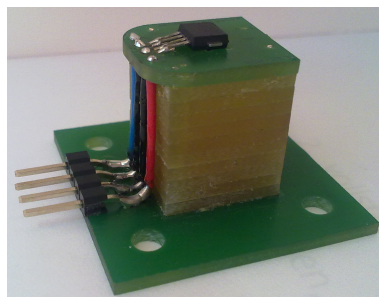


Abbildung 2.41: Sensorfassung zur Montage am Messmodul [9]. Durch einen integrierten Piezosensor als Kollisionsdetektor wird der Radmessplatz gegen Beschädigung im automatisierten Betrieb geschützt.

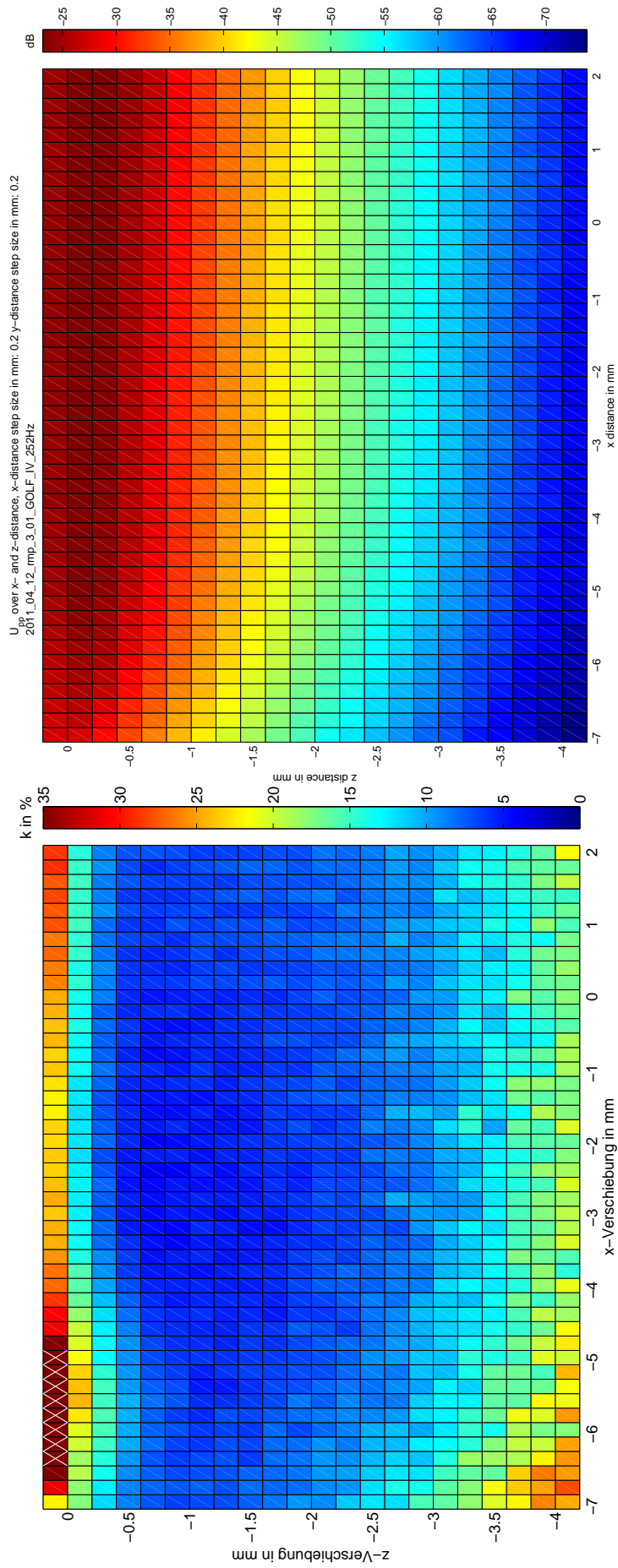


Abbildung 2.42: Diese Farbdarstellung des durch Signalverarbeitung ausgewerteten Sensorsignals über Versatz und Luftspalt zum Encoderrad entstand mit dem Radmessplatz RMP3. Die Werte für die Signalamplitude (rechts) oder für den Indikator HDI (links) sind in Farbe kodiert. Die gekreuzten Felder kennzeichnen das Auftreten der Frequenzverdopplung. Auch hier zeigt sich, dass der Indikator HDI besser als die Amplitude die kritischen Arbeitspunkte feststellen kann.

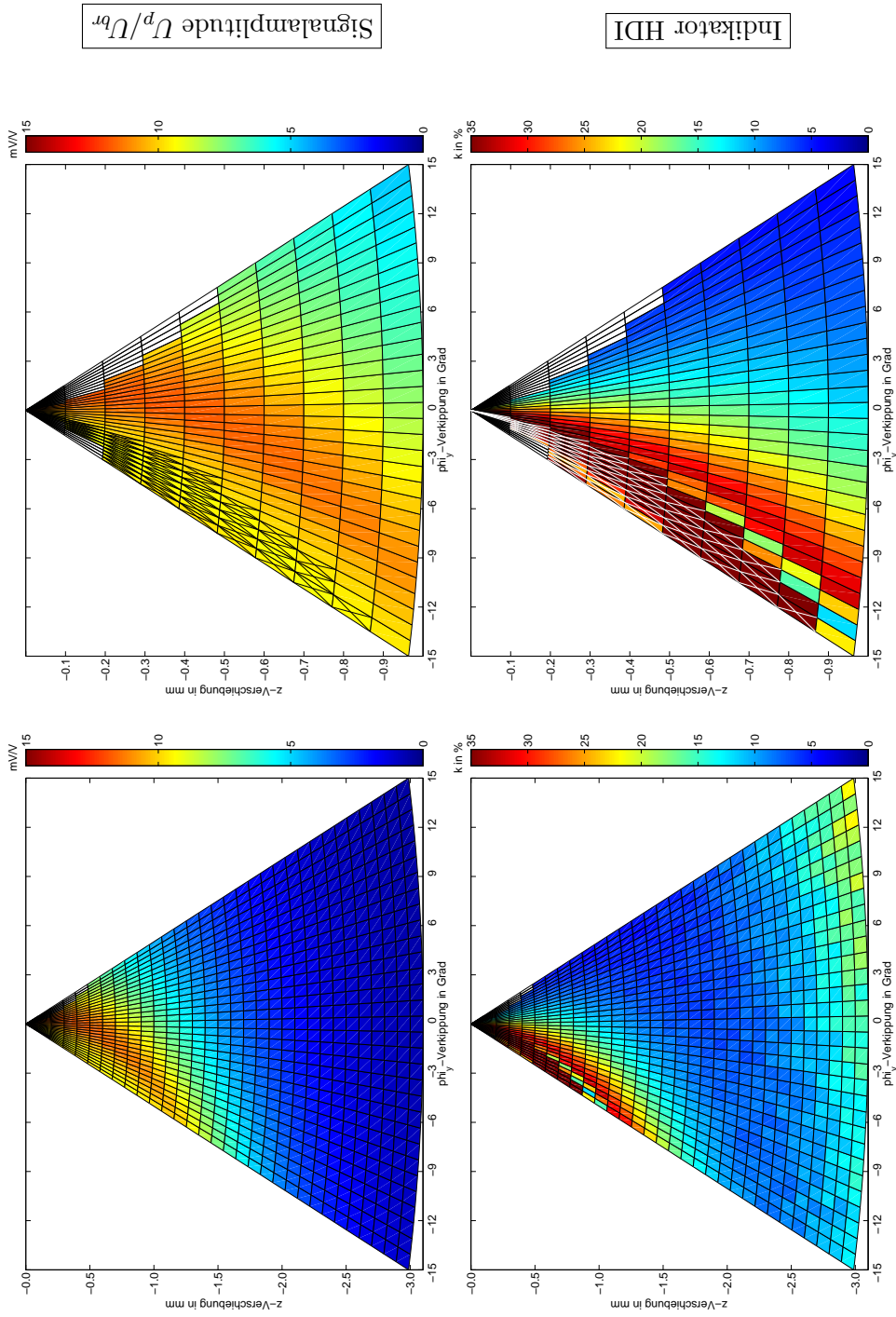


Abbildung 2.43: Diese Farbdarstellung des durch Signalverarbeitung ausgewerteten Sensorsignals über Verkipfung und Luftspalt zum Encoderrad entstand mit dem Radmessplatz RMP3. Die Werte (Signalamplitude oder Indikator HDI) sind in Farbe kodiert. Die gekreuzten Felder kennzeichnen die sog. Frequenzverdopplung. Die Amplitude (oben) allein ist nicht signifikant für einen optimalen Arbeitspunkt (nichtlineares Systemverhalten). Die rechte Seite ist eine vergrößerte Darstellung des kritischen Nabbereichs mit sehr kleinem Airgap.

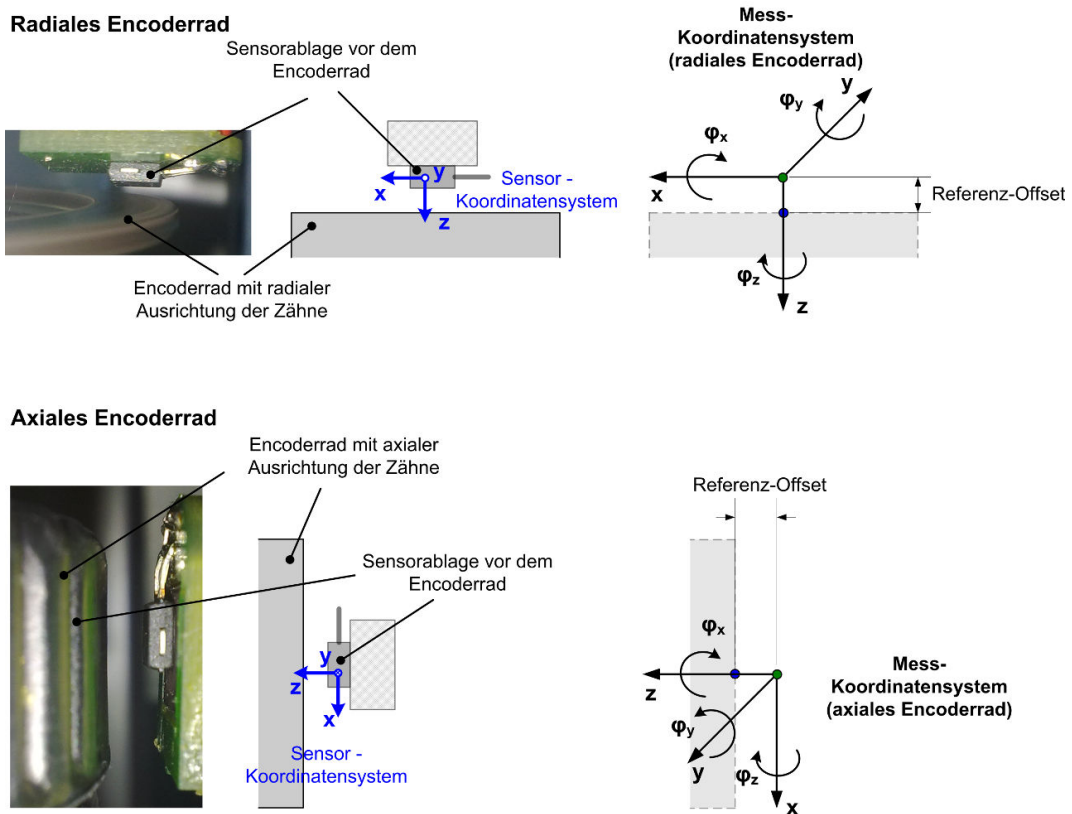


Abbildung 2.44: Sensorkoordinatensysteme für radiale und axiale Encoder [35]

Parameter	Erstes Vormuster RMP1	Zweites Vormuster RMP2	Laborsystem RMP3
Hauptfunktion	lineares Variieren Luftspalt	lineares Variieren des Luftspaltes und seitliches Verschieben sowie einachsiges Verkippen	vollständiges lineares Verfahren und Verkippen in allen Achsen für austauschbare Encoder
Angestrebte Wiederholgenauigkeit	ca. $100\mu m$	ca. $100\mu m$ bzw. 2°	$15\mu m$ bzw. $0, 25^\circ$
Bewegliche Achsen	2 Linearachsen	4 (3 Linearachsen, 1 Drehachse)	7 (3 Linearachsen, 4 Kipp / Drehachsen)
davon Achsen mit Schrittmotorsteuerung	1	3	7
SW-Steuerung	Matlab/TMCL RS232	Matlab/TMCL RS485	Matlab/TMCL Ethernet/RS485
Rotationsantrieb	DC mit Getriebe	Schrittmotor	Schrittmotor + Brushless DC
Drehzahl	ca. 20-100 1/min	ca. 3-200 1/min	unter 1 bis über 4000 1/min (voller Spezifikationsbereich)
Drehzahlsteuerung	manuell	Matlab/TMCL	Matlab/TMCL
Art des Encoders	passiv Referenz-Encoder	aktive Referenz-Encoder	passive/aktive Encoder/Radlager Serienteile VW und BMW (opt. weitere Herst.)

Tabelle 3: Eigenschaften der erstellten Radmessplätze

2.5 Sensor-Zustandsbestimmung und Signalsynthese

Die ersten Signalanalysen wurden von Diplomarbeiten von A. Mahtouf [22] und N. Jegenhorst [10] durchgeführt. In diesen Arbeiten wurden mit Vormustern des RMP3 erste spektrale Analysen des Sensorsignals durchgeführt mit dem Ergebnis, dass bei kleinem Airgap (z -Achse) starke Verzerrungen und in der Verkippung der φ_y eine Frequenzverdopplung auftritt. Die Abbildung 2.45 zeigt Beispiele für solche Signale. Sie verdeutlicht, wie stark die Qualität des Sensorsignals von der Einbauposition abhängt.

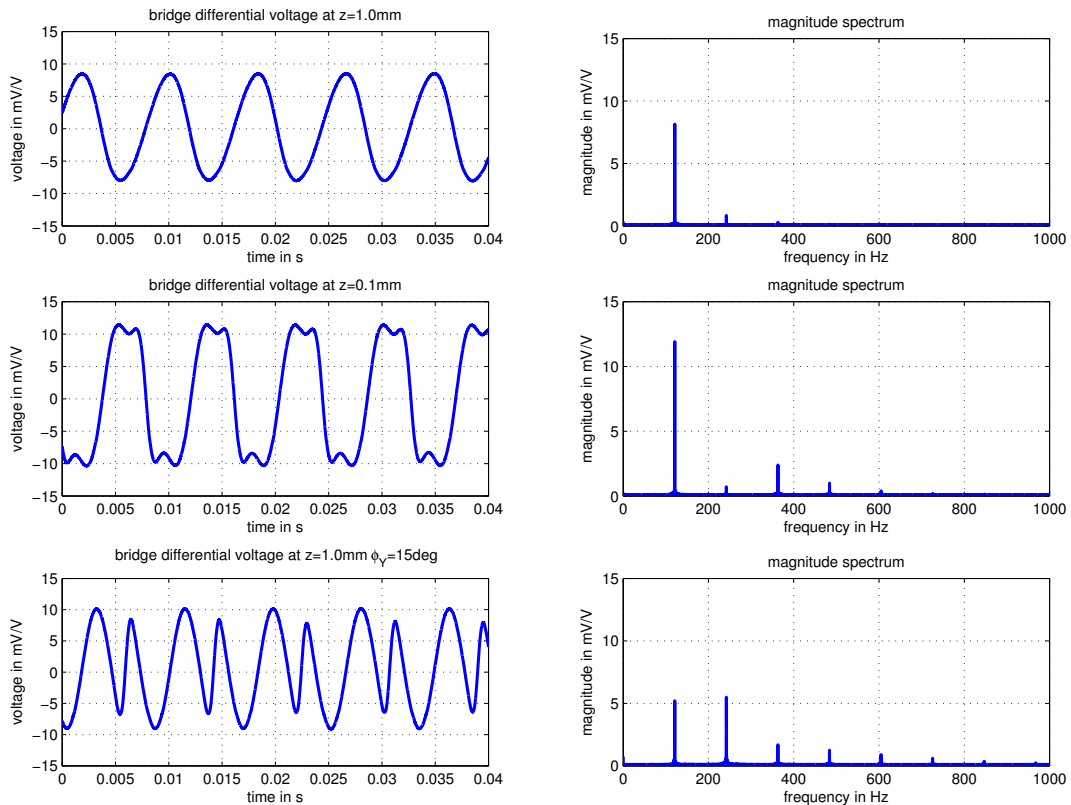


Abbildung 2.45: AMR-Sensorsignale aufgenommen bei unterschiedlichen Einbaupositionen. Links sind die Zeitsignale und rechts die zugehörigen Spektren dargestellt. Das obere Signal zeigt ein annähernd sinusförmiges Signal bei einer guten Einbauposition. Das mittlere Signal zeigt starke Verzerrungen durch einen zu geringen Airgap. Beim unteren Signal ist eine sogenannte Frequenzverdopplung dargestellt, verursacht durch eine starke Verkippung φ_y . Die Spannungswerte werden in der Einheit mV/V, also in Bezug auf die Brückenversorgungsspannung, angegeben. Durch diese Normierung kann der Ausgangswert von der Brückenversorgungsspannung unabhängig werden.

Die Bestimmung der Harmonischen aus den Sensorsignalen kann auf zwei unterschiedliche Arten durchgeführt werden. Es können einzelne Zahnperioden ausgewertet werden oder komplette Encoderperioden. Die Analyse einzelner Zahnperioden liefert Informationen über den Zustand einzelner Encoderzähne. Die Analyse von Encoderperioden hingegen zeigt Informationen über den Unrundlauf des Encoders.

Erkennung von frequenzverdoppelnden Effekten

Beim Fall der sogenannten „Frequenzverdoppelung“ dominiert die 2. Harmonische in den spektralen Frequenzanteilen. Er tritt zwar nur sehr selten bei extrem verkippten Sensoren auf, ist aber in der Auswirkung besonders gravierend. Durch eine Veränderung der Anzahl der in die Harmonischen-Analyse einbezogenen Perioden über geeignete Reduzierung der Abtastung kann durch eine nur leicht modifizierte Signalverarbeitung auch ein Frequenzanteil berücksichtigt werden, der unterhalb der tatsächlichen oder fälschlicherweise vermuteten ersten Harmonischen liegt. Ist dieser untere Frequenzanteil charakteristisch stark ausgeprägt, so kann gefolgert werden, dass die Signalfrequenz nicht korrekt ermittelt wurde. Vereinfacht kann diese Analyse als „Frequenzverdopplungs-Erkennung“ bezeichnet werden. Sie ist wirksam, solange Anteile der korrekten Encoderfrequenz im sehr stark verzerrten Signal noch enthalten sind. Das damit nahezu alle bisher kritischen Fälle der „Frequenzverdopplung“ erkennbar sind, konnte durch umfangreiche Erprobung am Radmessplatz, mit synthetischen Signalen aus einem Frequenzgenerator und mit der noch zu schildernden Signalsynthese, gezeigt werden. Die entsprechenden Messkennfelder sind durch eine Kennzeichnung der Fälle mit deutlich ausgeprägten Effekten, die Frequenzverdopplung oder zumindest eine unsichere Frequenzerkennung im bisherigen Sensor aufweisen, ergänzt worden. Diese Signalverarbeitung wurde durch Modifikation der Controller-Software auf dem Modul der Experimentalplattform im Rahmen einer studentischen Arbeit eingebracht und erfolgreich erprobt [30].

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass das modulare Konzept der Experimentalplattform sich sehr gut bewährt hat und zahlreiche Untersuchungen und Weiterentwicklungen auf dieser Basis möglich waren. Auch wenn der Umfang der Module und der Softwarevarianten bereits groß geworden ist, sollte die Experimentalplattform für den Fall späterer Untersuchungen weiterhin einen guten Ausgangspunkt darstellen.

Weitere Einzelheiten zur Signalverarbeitung, insbesondere Varianten der Unterabtastung und der Einbeziehung einer oder mehrere Signalperioden, sind in der Dissertation Krey [17] ausführlich dargestellt. Dort wird die zugrundeliegende nachrichtentechnische Theorie berücksichtigt und auch der Nachweis geführt, dass der relevante Informationsgehalt auf nur wenige Harmonische limitiert ist. Auf dieser Basis werden Rechenvorschriften für sogenannte Indikatoren vorgeschlagen, die in unterschiedlich aufwändiger Weise zu realisieren sind und jeweils die verschiedenen Diagnoseaussagen spezifisch abdecken (z.B. Unrundlauf, mittlere geometrische oder magnetische Ablagen, Einzelzahn- oder Einzelpolfehler des Encoders oder Frequenzverdopplung). Allen Rechenvorschriften für die Indikatoren ist gemeinsam, dass sie die erste Harmonische des Signals (Grundwelle des idealen Signals) mit höheren Harmonischen in Beziehung setzen. Die Vertiefung und Theorie soll der Dissertation vorbehalten bleiben.

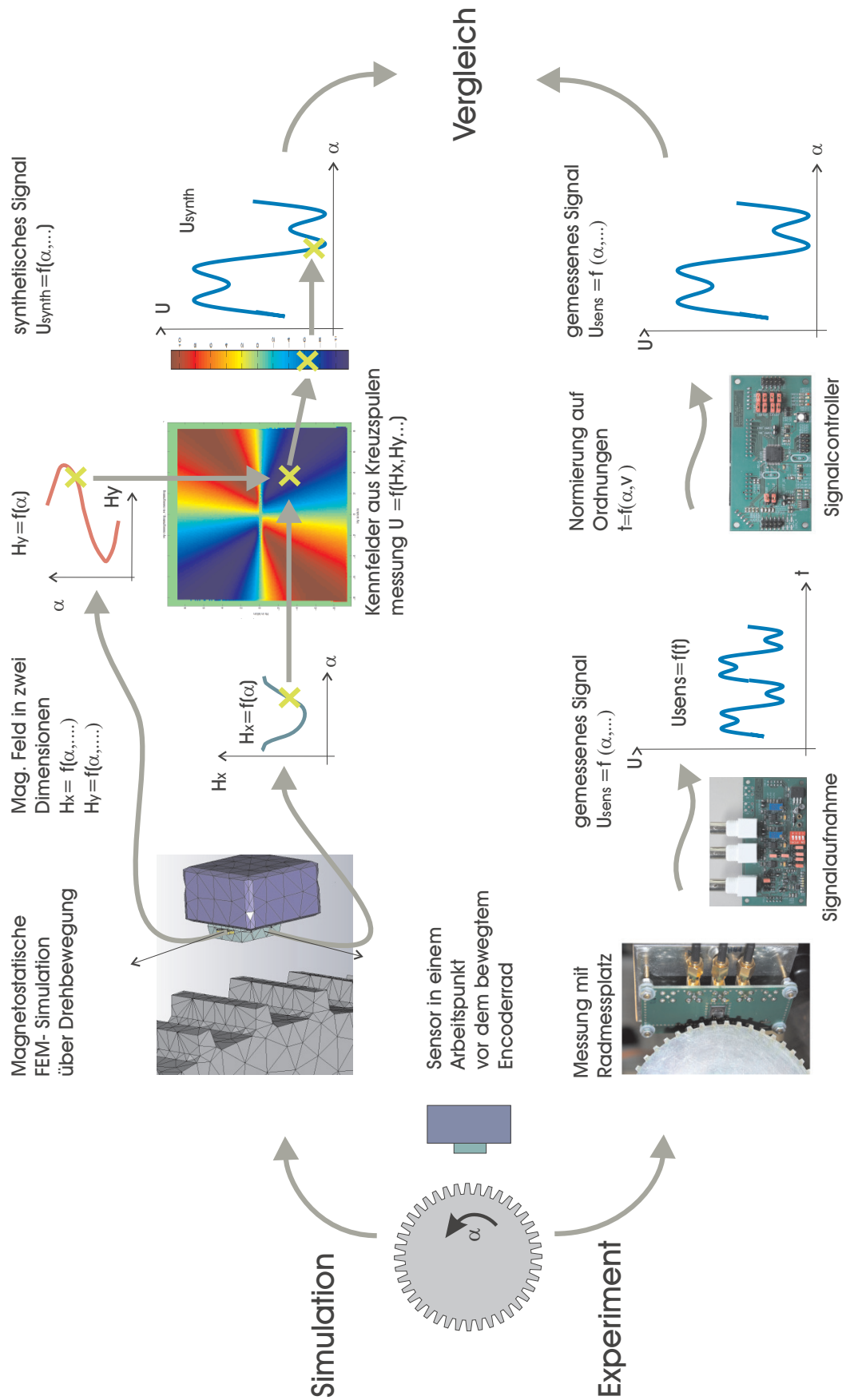


Abbildung 2.46: Die experimentellen Ergebnisse werden synthetischen Signalen aus Feldsimulationen und Kennfeldauswertung gegenübergestellt.

Auf der Basis von Kennfeldern die jetzt mit dem Kreuzspulenmessplatz erfasst werden konnten, wurde ein Verfahren der Sensorsignalsynthese entwickelt. Dieses Verfahren schließt die Lücke von der simulativen Nachbildung der magnetischen Verhältnisse zwischen Sensor und Encoderrad und dem entstehenden elektrischen Sensorausgangssignal. Damit konnte die Kette von dem mechanisch bewegten Encoderrad über das modulierte Magnetfeld bis zum elektrischen Sensorausgangssignal geschlossen werden. Die Syntheseergebnisse können unmittelbar mit Messwerten vom Radmessplatz erfasst und verglichen werden. Im Rahmen der bereits erwähnten Masterarbeit wurden aktive und passive Encoderräder als Simulationsmodelle erstellt. Während die passiven Encoderräder mit Hilfe von Präzisionsmessanlagen aus dem Department Maschinenbau in ihrer Geometrie vermessen wurden, stellte sich für die aktiven Encoderräder das unerwartete Problem, dass nur wenige magnetische Parameter verfügbar waren. Insbesondere war der präzise Verlauf der Magnetisierung in Feldstärke und vektoriel-ler Richtung für die wechselnden Pole unbekannt. Mit Hilfe des Radmessplatzes und einem Gaussmeter sowie einem hochwertigen zweidimensionalen Gaussmeter beim Industriepartner NXP konnte der Verlauf in umlaufenden Spuren in hoher Dichte erfasst werden.

In der Masterarbeit Zippel [39] wurden Rotationsbewegungen bei verschiedenen Sensorposi-tionen simuliert und die Feldstärke an den geometrischen Positionen der magneto-resistiven Widerstände aufgezeichnet. Dieses erforderte sehr lange Rechenzeiten, dennoch gelang für eine repräsentative Auswahl dieser Positionen eine Datenerhebung. Der neuartige Schritt war die Kombination mit den zweidimensionalen Kennfeldern des Sensors. Es konnte gezeigt werden, dass der magnetische Einfluss einen zweidimensionalen Effekt auf den Sensor bewirkt. Die vom Encoder bewirkte Feldstärkenänderung folgt einem Orbital im Verlauf der Bewegung des Ra-des von Zahn zu Zahn bzw. von Pol zu Pol des Encoders. Das Orbital hat eine ellipsenähnliche Form, wobei die Lage und Größe des Orbitals im stark nicht linearen Kennfeld entscheidend von der geometrischen Position des Sensors bestimmt ist. Die Folge der Nichtlinearität sowohl im magnetischen System als auch im Sensorsystem bewirkt die Signalverzerrung. Es gelangen sehr gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen Signalen und synthetisierten Signalen. Dieses neuartige Verfahren ermöglicht ein viel genaueres Verständnis des Sensorverhaltens. Das Verfahren wurde publiziert [15] und gemeinsam mit Experten des Sensorherstellers in Details verifiziert. Die Abbildungen 2.47 und 2.48 stellen Beispiele für unterschiedliche Sen-sorpositionen detailliert vor. Die Verzerrung und der ausgeprägte Harmonischen-Anteil wird insbesondere in der Abbildung 2.48 ersichtlich. Typische Orbitale und Signalverläufe sind als Übersicht in der Abbildung 2.49 dargestellt. Hier wird die Problematik des nichtlinearen Systems und der komplexen Signalformen anschaulich.

Als begrenzender Faktor wird bisher die Rechenzeit des 3D-FEM-Simulators von vielen Stun-den je Encoderperiode in 64 Bewegungsteilschritten gesehen, die Anwendung des Kennfeldes in einem anschließenden Programmmlauf ist unerheblich. Weil jeder der Bewegungsteilschritte unabhängig berechnet werden kann, ist das Vorgehen hochgradig parallelisierbar. Somit kann es auf einem Rechnerpool bzw. Mehrkernservern entscheidend beschleunigt werden, allerdings fallen hohe Kosten für die kommerzielle Simulatorsoftwarelizenz an.

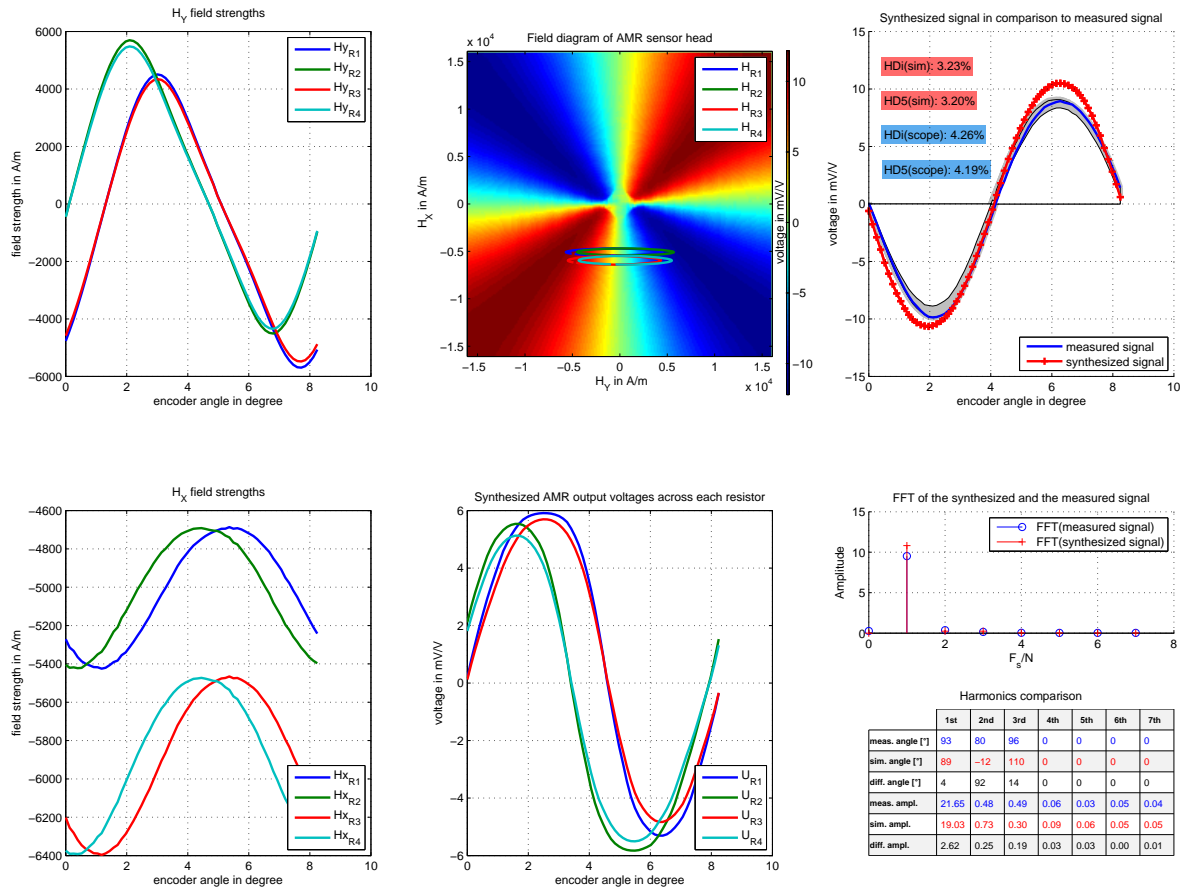


Abbildung 2.47: Signalsynthese aus Feldsimulation (links) und Kennfelddaten (Mitte oben), die elektrischen Ausgangssignale des Sensors werden je Brückenwiderstand bestimmt (Mitte unten), rechnerisch zusammengefasst (rot rechts oben) und mit den Messwerten (blau rechts oben) verglichen, zusätzlich werden die Signale im Spektralbereich (rechts unten) dargestellt Golf IV Encoder (axial) mit einer Sensorposition von $z = -0,5 \text{ mm}$.

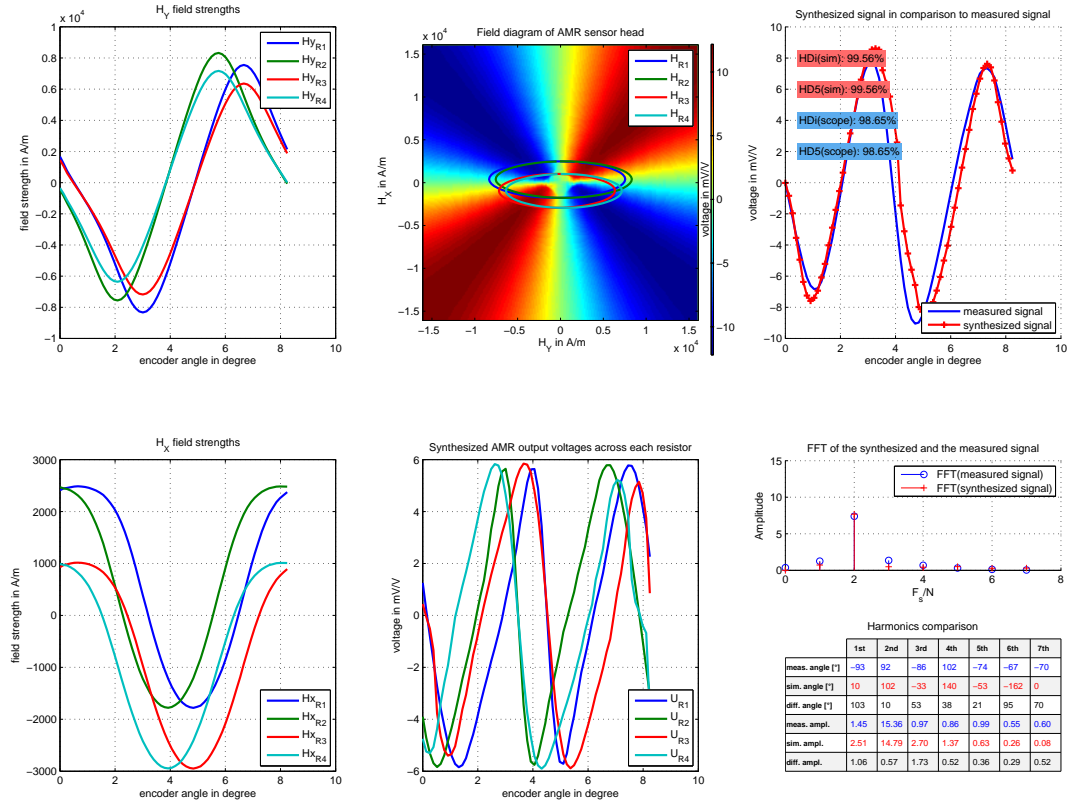
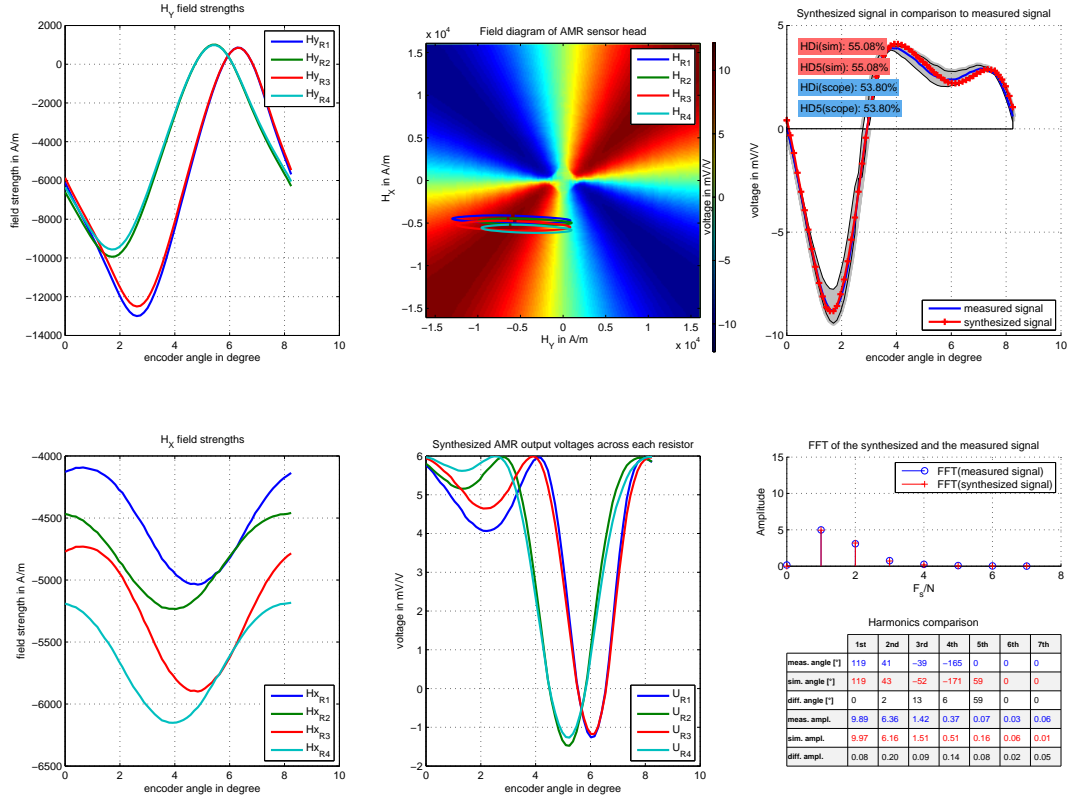


Abbildung 2.48: Signalsynthese wie Abb. 2.47 Sensorposition $z = -0,4\text{ mm}$ und $\varphi_y = 12^\circ$ (oben) und $z = -0,3\text{ mm}$ und $\varphi_y = -10^\circ$ (unten)

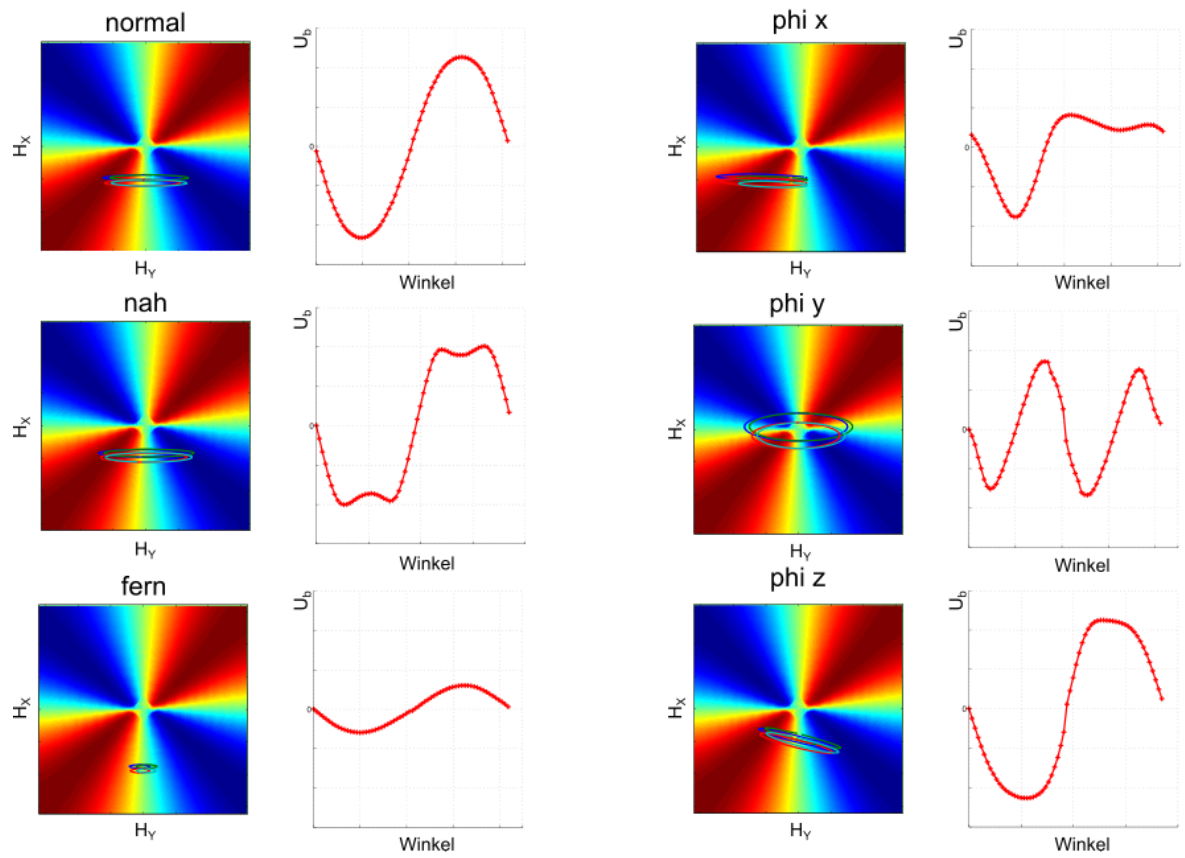


Abbildung 2.49: Darstellung unterschiedlicher Sensorausgangsspannungen U_b mit Darstellung des Feldstärkenverlaufs innerhalb des Sensorkennfelds für verschiedene Sensor-Encoder-Positionen

2.6 Demonstration für die Anwendung, Verwertung und Transfer

Der Schwerpunkt dieses Arbeitspaktes im Projekt waren Fragen der Verwertung und Weiterführung. Dabei wurden die folgenden Aspekte in den Vordergrund gestellt:

- Exemplarische Chipintegration (ggf. als Ausgangspunkt eines Folgeprojektes)
- Synthese und Simulation nach dem entwickelten Verfahren in die Entwurfspraxis einführen
- Grundlagen für weitere Arbeiten an der Signalvorverarbeitung zu legen
- Schutzrechte sichern und verwerten
- wissenschaftliche Ergebnisse zusammenfassen und bewerten (Veröffentlichungen und Dissertation)

Die wirtschaftliche Verwertung kann nur beim Sensorhersteller geschehen, daher ist eine präzise Abstimmung mit den Entwicklungszielen dort erforderlich. Das soll Ausgangspunkt eines Folgeprojektes werden.

Veröffentlichungen

Auf den Hochschultagen 2010, 2011 und 2012 und der Veranstaltung 'Nacht des Wissens' 2010 wurde das Projekt in allgemein verständlicher Form vorgestellt. Vom gesamten Projektteam unterstützt, wurde die Eigendiagnose der Sensoren durch praktische Demonstration dem breiten Publikum nahegebracht. Die Vorstellung auf einer Fachkonferenz/Messe für Signalverarbeitung Radcom 2010 ist mit einem Postervortrag im April 2010 erfolgt [18]. Weiterhin wurde das Projekt in der Vortragsreihe 'Innovationen in Forschung und Entwicklung' an der HAW Hamburg im Dezember 2010 vorgestellt [19]. Auf der Tagung Microtec Nord 2011 in Hamburg wurden die Ergebnisse vorgestellt [20]. Ein Vortrag auf dem Internationalen Forum Mechatronik in Cham im September 2011 [14] ist auf Beachtung im Fachpublikum gestoßen. In einem Beitrag für die IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference wurde das Verfahren der Signalsynthese vorgestellt [15]. Auf der Konferenz IEEE System on Chip Conference wird im September 2013 die Architektur und die Signalverarbeitungsalgorithmen des entwickelten ASIC vorgestellt [16].

Erfindungen

Eine Dienst-Erfindungsmeldung im Rahmen des Projektes ist im Januar 2012 erfolgt, die auf Lösungen aus dem Vorjahre beruht. Als Miterfinder ist ein Student, der wissenschaftliche Mitarbeiter und der Projektleiter beteiligt. Die Erfindung wurde zum nationalen und internationalen Patent angemeldet. Sämtliche Rechte wurden durch die Hochschule an den Industriepartner verkauft. Der Großteil des eingenommenen Geldes wurde für die Weiterfinanzierung des WMA verwendet. Wie bei Schutzrechtsanmeldungen üblich, kann erst nach der Offenlegung / Freigabe darüber berichtet werden.

2.7 Studentische Arbeiten

Insgesamt 18 studentischen Arbeiten leisten wichtige Beiträge zu den Arbeitspaketen im Projekt. Als Übersicht sind diese Beiträge in der Abbildung 2.50 dargestellt.

- In der Diplomarbeit Mahtouf [22] konnten die ersten Nachweise erbracht werden, dass die harmonische Verzerrung des Sensorsignals ein Indikator für den Arbeitspunkt des Sensors ist. Mit Hilfe eines provisorischen Messplatzes und eines Speicheroszilloskopes konnten erste Messdaten aufgenommen und in Matlab ausgewertet werden.

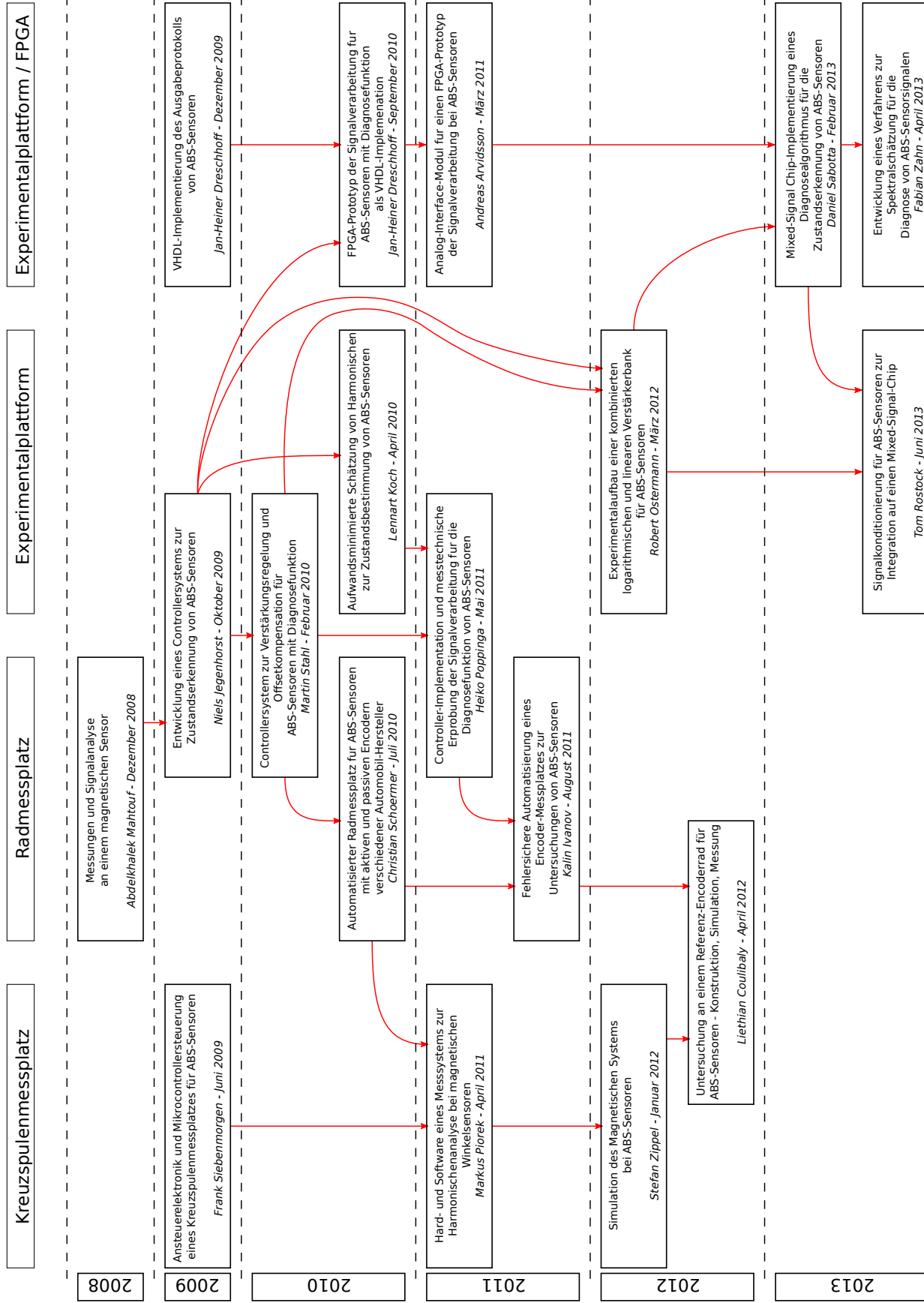


Abbildung 2.50: Übersicht über studentische Abschlussarbeiten im Projekt ESZ-ABS

- Zur Analyse und Aufnahme von Kennlinien des im Sensorkopf befindlichen AMR-Sensors wurde in der Diplomarbeit Siebenmorgen [36] ein Kreuzspulennessplatz-System entwickelt. Er besteht aus unterschiedlichen Spulensystemen und einer Leistungsendstufe, welche die nötigen Ströme für die Spulen liefert. Außerdem befindet sich in der Leistungsendstufe ein Mikrocontroller zur Vorgabe von Feldstärken und Aufnahme von Sensorsignalen. Als Rahmen dieser Arbeit entstanden genaue Kennfelder des Sensors, welche das magnetisch-elektrische und das Hysterese-Verhalten beschreiben.
- Die erste Implementierung der Harmonischen-Analyse auf einer Embedded-Hardware erfolgte in einer Diplomarbeit Jegenhorst [10]. Hier wurde eine modulare Experimentalplattform mit analoger Signalaufbereitung, digitaler Auswertung der Signale auf einem Mikrocontroller (MSP430), Displayeinheit und Kommunikationsschnittstelle zum PC entwickelt. Der in Matlab implementierte Algorithmus von Mahtouf [22] wurde auf die Programmiersprache C portiert und optimiert. Durch diverse Messreihen wurde die Funktion des Algorithmus nachgewiesen. Insbesondere konnte praktisch gezeigt werden, dass durch Unterabstastung und durch Priorisierung zwischen Sensor- und Diagnosefunktion minimale Rechenressourcen ausreichen können.
- Basierend auf den Erfahrungen aus dem ersten und zweiten Vormuster des Radmessplatzes wird in der Diplomarbeit Schoermer [35] der Präzisionsmessplatz RMP3 entwickelt. Diese Arbeit erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern und einem Konstruktionsbüro, welches auf Präzisionsmessplätze spezialisiert ist. Zu den Aufgaben zählt die Planung, die Konstruktion, die Inbetriebnahme, die Automatisierung des Messplatzes und das Durchführen erster Messungen als Funktionsnachweis. Zu den Besonderheiten zählt, dass mit diesem Messplatz auch Encoder-Serienteile der Automobilindustrie verwendet werden können. Hervorzuheben ist, dass die Diplomarbeit von Schoermer [35] mit dem Hamburger VDI-Preis (1. Preis) für die beste Abschlussarbeit ausgezeichnet wurde.
- In der Studienarbeit von Dreschhoff [6] wurde das Ausgabeprotokoll in programmierbarer Logik implementiert und an der Experimentalplattform erprobt.
- In der Bachelorarbeit Stahl [37] wurde ein zusätzliches Modul für die Experimentalplattform entwickelt, welches eine Offset- und Verstärkungsregelung übernimmt. Dieses ist notwendig, da die Amplituden der Sensorausgangsspannung stark mit dem Abstand Sensor-Encoderrad schwanken. Bei Verkippungen des Sensors treten ebenfalls Offsetschwankungen auf, die vor der Verstärkung kompensiert werden müssen. Das Regel-Modul ist mit einem eigenen Mikrocontroller (MSP430) ausgestattet, der nur für die Regelung zuständig ist. Mit diesem Modul ist es jetzt möglich, Verstärkung und Offsets on-the-fly nachzuführen, welche durch umfangreiche Messreihen nachgewiesen wurden. Die besondere Schwierigkeit lag in den Initialzuständen nach dem Einschalten, wo innerhalb von kürzester Zeit das Signal optimal ausgeregelt werden muss.
- Die weitere theoretische Untersuchung und Optimierung des zuvor Jegenhorst [10] entwickelten Algorithmus erfolgte in der Arbeit Koch [13]. Es wurde ein um den Faktor drei schnellerer Algorithmus zur Harmonischen-Schätzung entwickelt als der bisherige. Weiterhin wurde untersucht, wie sich das bereits in der zuvor erfolgten Arbeit Jegenhorst [10] entwickelte Abtastverfahren bei unrundlaufenden Encoderrädern auf das Ergebnis auswirkt und optimierte Abtastverfahren vorgestellt.
- Die Umsetzung der Mikrocontrollersoftware aus der ersten Arbeit Jegenhorst [10] in VHDL erfolgte in der Arbeit Dreschhoff [7]. Durch die Anwendung von Pipeline-Techniken konnte der bekannte Algorithmus dahingehend parallelisiert werden, dass eine zahnweise

Harmonischen-Schätzung des Encoderrades durchgeführt werden kann. Dabei konnten bereits erste Erkenntnisse aus der theoretischen Arbeit Koch [13] einfließen.

- Die nötige Hardware für die Diplomarbeit Dreschhoff [7] wurde in der Studienarbeit Arvidsson [1] entwickelt. Hier wurde eine Platine mit ADCs, DACs und Komparatoren aufgebaut, welche an FPGA-Evaluierungsboards der Hochschule angeschlossen werden kann. Das Modul zur Offset- und Verstärkungsregelung Stahl [37] und das Verstärkungs-Modul Jegenhorst [10] können hier weiter verwendet werden. Als Funktionsnachweis wurden Testroutinen und eine Schnittstelle zu MATLAB implementiert.
- Die Diplomarbeit Piorek [29] hat zum Ziel, zum einen den typverwandten Winkelsensor mit dem Kreuzspulenmessplatz [36] zu untersuchen und zum anderen, die bisher manuelle Positionierung des bereits fertiggestellten Messplatzes mit Schrittmotoren zu automatisieren. Letzteres ist vorteilhaft, um den geometrischen Punkt mit der besten Näherung der Feldhomogenität zu finden. Zur Erklärung der aufgetretenen Messfehler wurden in dieser Arbeit erste 2D-FEM Simulationen durchgeführt.
- Damit das aufwändige Messsystem des RMP3 Schoermer [35] bei möglichen Kollisionen mit dem Encoderrad nicht beschädigt wird, wurde eine Kollisionserkennung in Ivanov [9] entwickelt. Ein Piezoplättchen innerhalb der Sensorfassung dient hierbei als Sensor. Kommt es zu einer Kollision, so werden sämtliche Schrittmotoren des Messsystems und der Antriebsmotor des Encoderrads sofort abgeschaltet. Zusätzlich werden aufwändige Messreihen mit allen verfügbaren Encoderrädern durchgeführt und besonders kritische Sensorpositionen detaillierter untersucht.
- Die Implementierung der in der theoretischen Diplomarbeit Koch [13] vorgestellten Algorithmen in den Mikrocontroller der Experimentalplattform wurde in der Arbeit Poppinga [30] durchgeführt. Zusätzlich wurden neue Algorithmen vorgestellt, welche die kritische Situation der Verdopplung der Zahnfrequenz zuverlässig erkennen. Diese Frequenzverdopplung tritt unter besonderen Verkippsituationen des Sensors vor dem Encoderrad auf. Messreihen am RMP3 und Messdaten aus der laufenden Diplomarbeit Ivanov [9] lieferten den Funktionsnachweis.
- Die Masterarbeit Zippel [39] beschäftigte sich mit der Simulation des magnetischen Systems bei ABS-Sensoren. Hierbei werden Encoderräder mechanisch und magnetisch vermessen und in eine 3D-FEM-Simulationssoftware modelliert, um genauere Kenntnisse über die Feldstärken im AMR-Sensorkopf zu erhalten. Zusätzlich wurde in dieser Arbeit der Kreuzspulenmessplatz um einen Kreuzspulenkasten für Feldstärken bis zu 80 kA/m entwickelt und aufgebaut.
- In der Bachelorarbeit Ostermann [25] wurde die bereits erläuterte kombinierte linear/logarithmische Verstärkerbank entwickelt. Da die Signale der AMR-Messbrücke eine große Dynamik haben, wird mit dem logarithmischen Verstärker das Sensorsignal optimal auf einen kleinen Spannungsbereich abgebildet. Mit Hilfe des logarithmischen Signals können somit die Sensorgrundfunktionen ausgeführt werden. Eine Verstärkungsregelung kann entfallen, jedoch ist eine Offsetregelung weiterhin erforderlich. Zur Sensordiagnose wird auf die linear verstärkten Sensorsignale der Verstärkerbank zurückgegriffen.
- In der Diplomarbeit Coulibaly [3] wurde ein neues Encoder-Modul mit dem vom Industriepartner spezifizierten Referenzencoder DN5 für den Radmessplatz (RMP3) konstruiert und aufgebaut. Weiterhin wurden die Parameter des Messplatzes an das neue Encoder-Modul angepasst. Zusätzlich wurden 2D-FEM-Simulationen des Systems aus DN5-Encoderrad und ABS-Sensor durchgeführt, um zu prüfen, ob sich die mehrere

Stunden andauernde Simulationsdauer der 3D-FEM-Simulation reduzieren lässt. Das hat sich nicht bestätigt.

- In der Masterarbeit Sabotta [34] wurde die Mixed-Signal-Chip-Implementierung des Diagnosealgorithmus von Jegenhorst [10], Koch [13] und Poppinga [30] auf Basis der Diplomarbeit Dreschhoff [7] vorbereitet. Die Umsetzung des Digitalteils steht hierbei im Vordergrund. Studentische Hilfskräfte im Projektteam sollen unterstützend den Analogteil basierend auf den Vorarbeiten Ostermann [25] vorbereiten.
- In der Masterarbeit Zahn [38] wurde ein alternatives Verfahren zur Berechnung der DFT entwickelt und exemplarisch in VHDL implementiert. Das alternative Verfahren verwendet statt Cosinus- und Sinusfunktionen, wie sie in der DFT verwendet werden, einfache Rechtecksignale. Mit diesem Verfahren kann ein Großteil der Multiplikationsoperationen durch einfache Additionen ersetzt werden.
- In der Masterarbeit Rostock [33] wurde der von Ostermann [25] entwickelte approximiert logarithmische Verstärker in ein Mixed-Signal ASIC integriert und charakterisiert. Weiterhin wurden verschiedene Regelverfahren in VHDL implementiert und evaluiert.

2.8 Mögliche Schwerpunkte von Folgearbeiten

Nach Abschluss des Vorhabens und der weiterhin positiven Resonanz beim Industriepartner NXP werden als Schwerpunkte gesehen:

- Nutzung der geschaffenen Messplätze, z.B. für weitere Encoderräder oder neue/andere Sensortypen
- Verifikation und Analyse der Grundlagen, z.B. Schaffung einer Signalsynthese aus Simulation und Kennfeld für Entwicklungsarbeiten von Sensor und Encoder
- Prototypische mikroelektronische Umsetzung der Harmonischen Analyse in einem Folgeprojekt

Über das Projekt und die erzielten Ergebnisse wurden auf einem firmeninternen Kolloquium bei NXP im Juni 2011 in Vortragsform berichtet. Eine ausführliche Diskussion unter reger Beteiligung der Fachexperten schloss sich an. Hierbei und bei weiteren Projekttreffen sind wichtige Informationen ausgetauscht worden. Insbesondere sind Fragen aktueller Produkt- und Technologieentwicklungen eingeflossen. Diese Ansätze sollen in Folgevorhaben weitergeführt werden. Für das Projekt relevant waren im Berichtszeitraum die Verfolgung der Teilthemen der logarithmisch/linearen Verstärkerbank und die durchgängige Signalsynthese auf Basis vermessener oder errechneter Kennfelder. Es wird auch auf Seiten des Projektpartners eingeschätzt, dass die Ergebnisse wertvoll und aktuell sind.

2.9 Erweiterung in der Zielsetzung und Fortschreibung des Arbeitsplans

Eine Erweiterung der Zielsetzung ist nach dem Berichtszeitraum nicht mehr vorgesehen, der Projektfokus liegt im Abschluss der praktischen Arbeiten und vorallem in der Zusammenfassung und Aufbereitung im Rahmen der Dissertation des wissenschaftlichen Mitarbeiters.

Wie bereits berichtet, sind sehr gute Ansätze für weiterführende Arbeiten gegeben. Insbesondere sind zu nennen:

- weitere Nutzung der Messplätze
- Übertragung der Konzepte auf industrielle Messplätze

- Anwendung der Signalsynthese auf neue Sensortypen
- mikroelektronische Umsetzung der Harmonischen Analyse

Folgeprojekte sind auf dieser Basis sehr gut möglich und werden derzeit konkret vorbereitet.

III Referenzen und studentische Arbeiten

- [1] ARVIDSSON, Andreas: *Analog-Interface-Modul für einen FPGA-Prototyp der Signalverarbeitung bei ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, März 2011
- [2] BREUER, Bert (Hrsg.) ; BILL, Karlheinz H. (Hrsg.): *Bremsenhandbuch: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. 2. Auflage. Vieweg Verlag, 2004. – ISBN 9783528139520
- [3] COULIBALY, Liethian Y.: *Untersuchung an einem Referenz-Encoderrad für ABS-Sensoren - Konstruktion, Simulation, Messung*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, April 2012
- [4] DAIMLER AG: *Requirement Specifications for Standardized Interface for Wheel Speed Sensors with Additional Information „AK-Protokoll“*. 4.0. Februar 2008
- [5] DIBBERN, Uwe: Magnetic Sensors. In: GÖPEL, W. (Hrsg.) ; HESSE, J. (Hrsg.) ; ZEMEL, J. N. (Hrsg.): *Sensors a Comprehensive Survey* Bd. 5. Weinheim Germany : VCH, 1989, Kapitel 9
- [6] DRESCHHOFF, Jan-Heiner: *VHDL-Implementierung des Ausgabeprotokolls von ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Studienarbeit, Dezember 2009
- [7] DRESCHHOFF, Jan-Heiner: *FPGA-Prototyp der Signalverarbeitung für ABS-Sensoren mit Diagnosefunktion als VHDL-Implementation*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, 2010
- [8] Norm ISO 26262 Teil 1 bis 10 2011. *Road vehicles – Functional safety*
- [9] IVANOV, Kalin: *Fehlersichere Automatisierung eines Encoder-Messplatzes zur Untersuchung von ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, August 2011
- [10] JEGENHORST, Niels: *Entwicklung eines Controllersystems zur Zustandserkennung von ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, Oktober 2009
- [11] Schutzrechtsanmeldung EP 12178415 (Februar 2002). JEGENHORST, Niels ; KREY, Martin ; RIEMSCHEIDER, Karl-Ragnar (Erfinder); NXP Semiconductors Germany GmbH (Anmelder). Magnetic Sensor Arrangement
- [12] Schutzrechtsanmeldung US 81525346 (Februar 2002). JEGENHORST, Niels ; KREY, Martin ; RIEMSCHEIDER, Karl-Ragnar (Erfinder); NXP Semiconductors Germany GmbH (Anmelder). Magnetic Sensor Arrangement
- [13] KOCH, Lennart: *Aufwandsminimierte Schätzung von Harmonischen zur Zustandsbestimmung von ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, April 2010
- [14] KREY, M. ; RIEMSCHEIDER, K.-R.: Diagnose von magnetischen Drehzahlsensoren durch fortlaufende Harmonischen-Analyse. In: *Internationales Forum Mechatronik*. Cham, Germany, September 2011, S. 93–105

- [15] KREY, M. ; RIEMSCHEIDER, K.-R. ; ZIPPEL, S.: Signal synthesis for magnetoresistive speed sensors based on field simulations combined with measured sensor characteristic diagrams. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International*, 2012. – ISSN 1091–5281, S. 300 –305
- [16] KREY, M. ; SABOTTA, D. ; ZAHN, F. ; RIEMSCHEIDER, K.-R. ; RETTIG, R.: Development of Advanced Diagnostic Functions in Very High Volume Automotive Sensor Applications. In: *SOC Conference (SOCC), 2013 IEEE International*, 2013. – accepted for publication
- [17] KREY, Martin: *Systemarchitektur und Signalverarbeitung für die Diagnose von magnetischen ABS-Sensoren*, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Diss., geplant 2013/2014
- [18] KREY, Martin ; RIEMSCHEIDER, Karl-Ragmar: Experimentelle digitale Signalverarbeitung und Zustandserkennung für ABS-Sensoren. In: *Radcom 2010, Hamburg* (2010)
- [19] KREY, Martin ; RIEMSCHEIDER, Karl-Ragmar: Selbst-Diagnose von ABS-Sensoren mittels integrierter Signalverarbeitung. In: *Vortragsreihe Innovationen in Forschung und Entwicklung an der HAW Hamburg* (2010)
- [20] KREY, Martin ; RIEMSCHEIDER, Karl-Ragmar: Diagnose von magnetischer Sensoren mittels integrierter Signalverarbeitung. In: *Microtec Nord, Hamburg* (2011)
- [21] KREY, Martin ; RIEMSCHEIDER, Karl-Ragmar: *Signalverarbeitung zur Funktionsdiagnose bei magnetischen Sensoren*. EForum 2011, 2011
- [22] MAHTOUF, Abdelkhalek: *Messungen und Signalanalyse an einem magnetischen Sensor*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, Dezember 2008
- [23] NXP SEMICONDUCTORS: *Persönliche Kommunikation*. 2011
- [24] O’RIORDAN, N.: An automotive multi-chip module for rotational speed and direction measurement. In: *Systems on a Chip (Ref. No. 2000/110), IEE Workshop on*, 2000, S. 8/1–8/6
- [25] OSTERMANN, Robert: *Experimentalaufbau einer kombinierten logarithmischen und linearen Verstärkerbank für ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, März 2012
- [26] PHILIPS: *KMI18/2 Integrated rotational speed sensor*. 2000
- [27] PHILIPS: *KMI22/1 Rotational speed sensor for extended air gap application and direction detection*. 2000
- [28] PHILIPS SEMICONDUCTORS: *Semiconductor Sensors Data Handbook SC17*. 2001
- [29] PIOREK, Markus: *Hard- und Software eines Messsystems zur Harmonischenanalyse bei magnetischen Winkelsensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, April 2011
- [30] POPPINGA, Heiko: *Controller-Implementation und messtechnische Erprobung der Signalverarbeitung für die Diagnosefunktion von ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, Mai 2011
- [31] REIF, Konrad (Hrsg.): *Sensoren im Kraftfahrzeug (Bosch Fachinformation Automobil)*. 2. Aufl. 2012. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. – ISBN 9783834817785

- [32] RIEMSCHEIDER, Karl-Ragnar: *Eigendiagnose für magnetische ABS-Sensoren durch mitlaufende Harmonischen-Schätzung im Sensor-ASIC (SENDIA) - Forschungsantrag*. Validierung des Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung - VIP, 2013
- [33] ROSTOCK, Tom: *Signalkonditionierung für ABS-Sensoren zur Integration auf einen Mixed-Signal-Chip*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterarbeit, Juni 2013
- [34] SABOTTA, Daniel: *Mixed-Signal Chip-Implementierung eines Diagnosealgorithmus für die Zustandserkennung von ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterarbeit, Februar 2013
- [35] SCHOERMER, Christian: *Automatisierter Radmessplatz für ABS-Sensoren mit aktiven und passiven Encodern verschiedener Automobil-Hersteller*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, 2010
- [36] SIEBENMORGEN, Frank: *Ansteuerelektronik und Mikrocontrollersteuerung eines Kreuzspulenmessplatzes für ABS-Sensoren*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, Juni 2009
- [37] STAHL, Martin: *Controllersystem zur Verstärkungsregelung und Offsetkompensation für ABS-Sensoren mit Diagnosefunktion*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, Februar 2010
- [38] ZAHN, Fabian: *Entwicklung eines Verfahrens zur Spektralschätzung für die Diagnose von ABS-Sensorsignalen*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterarbeit, April 2013
- [39] ZIPPEL, Stefan: *Analyse des magnetischen Systems eines ABS-Sensors - Feldsimulation, automatisierte Kennfeldmessung, Signalsynthese*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterarbeit, Januar 2012