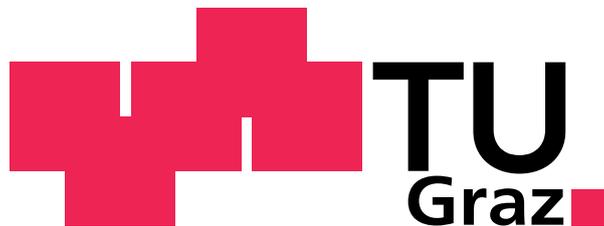


Michael Schullin

# Adaptierung eines Messsystems zur Spektralanalyse im Frequenzbereich bis zu 400kHz

Diplomarbeit



**Institut für Health Care Engineering**

Technische Universität Graz

Kopernikusgasse 24/I, A-8010 Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dr. N. Leitgeb

Begutachter: Univ.-Doz. Dr. J. Schröttner

Betreuer: Dipl.-Ing. F. Niedermayr

Graz, Juni 2010



# Danksagung

Diese Diplomarbeit markiert das Ende und zugleich den Beginn eines neuen Lebensabschnitts. Daher möchte ich diese Gelegenheit nutzen, um mich bei den Menschen zu bedanken, die mich bis jetzt auf diesem Weg begleitet haben.

An erster Stelle sind meine Eltern Ingrid und Albert zu erwähnen, die mir ein sorgenfreies Studentenleben ermöglicht und mich auf jede erdenkliche Weise unterstützt haben. Ganz besonderer Dank gilt auch meiner Freundin Anabel. Ihre Unterstützung und aufbauenden Worte, wenn es mal nicht wie gewünscht lief, hatten einen entscheidenden Einfluss auf den erfolgreichen Abschluss dieser Diplomarbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des *Instituts für Health Care Engineering* der *TU Graz*, die mir die Bearbeitung dieses Themas ermöglicht haben. Deren Einsatz, Hilfestellung und Betreuung hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Das gleiche gilt für Herrn Ing. Robert Neubauer, Mitarbeiter der *Europaprüfstelle für Medizinprodukte*, der bei der Erstellung der Leiterplatte und bei den zahlreichen Fragestellungen helfend zur Seite stand. Großer Dank geht auch an Herrn Dr. Gunter Winkler vom *Institut für Elektronik* der *TU Graz* für die Unterstützung bei der Durchführung der Testmessungen. Nicht minder dankbar bin ich Herrn Daniel Meckelin der Firma *Chauvin Arnoux* für die Bereitstellung spezifischer Informationen zum verwendeten Feldstärkemessgerät.

Auf diesem Wege möchte ich auch die zahlreichen Kollegen und Freunde erwähnen, die mich im Laufe meiner Ausbildungszeit begleitet haben. Ein großes Dankeschön geht an dieser Stelle an meinen Langzeitweggefährten Lukas Vogl, der mich mit hilfreichen Anmerkungen bei dieser Arbeit unterstützt hat. Ein sehr herzlicher Dank gebührt auch Hannes, Barbara, Julia, Heinz, Jenny, Albert, Sara, Dino, Patrick und vielen anderen. Danke für die schöne Zeit!

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....  
date

.....  
(signature)

# Kurzfassung

## **Titel**

*Adaptierung eines Messsystems zur Spektralanalyse im Frequenzbereich bis zu 400kHz*

## **Zusammenfassung**

Durch die Kombination des Feldstärkemessgeräts *C.A 42* (*Chauvin Arnoux*<sup>®</sup>) mit dem Spektrumanalysator *FSH 3* (*Rohde&Schwarz*<sup>®</sup>) wurde ein Messsystem für die Messung magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100 bis 400kHz zusammengestellt. Die Entwicklung der dafür erforderlichen Hard- und Software erfolgte im Zuge dieser Arbeit. Das dreikanalige Signal der Magnetfeldsonde des *C.A 42* wird über den Analogausgang ausgelesen und über die Hardware mit dem einkanaligen Eingang des *FSH 3* verbunden. Die Spektren der einzelnen Signale, die die magnetischen Flussdichten in drei aufeinander normalen Raumrichtungen repräsentieren, werden dadurch zeitversetzt gemessen. Nach Abschluss der Messung wird über die Software aus den gemessenen orthogonalen Komponenten eine Ersatzgröße berechnet, die mit Referenzwerten verglichen werden kann. Die durchgeführten Testmessungen zeigen die prinzipielle Funktion des Messsystems. Durch den Fehler in der Pegelanzeige des Spektrumanalysators von  $\pm 1,5$  dB und durch die mit einer Unsicherheit von  $\pm 15$  % behafteten Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde wird die Messunsicherheit des Gesamtsystems entscheidend beeinträchtigt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass zum Zeitpunkt der Projektdurchführung keine kommerzielle Erweiterung für das *C.A 42* erhältlich war, um eine Frequenzanalyse magnetischer Felder im Bereich von 100 bis 400kHz durchzuführen.

## **Schlüsselwörter**

Feldstärkemessgerät, Magnetfeldsonde, Spektrumanalysator, magnetische Flussdichte, Referenzwerte

# Abstract

## **Title**

*Adaption of a measuring system for spectrum analysis in the frequency range up to 400kHz*

## **Abstract**

By combining the fieldmeter *C.A 42* (*Chauvin Arnoux*<sup>®</sup>) with the spectrum analyzer *FSH 3* (*Rohde&Schwarz*<sup>®</sup>) a measuring system to determine the spectra of magnetic fields in a frequency range from 100 up to 400kHz was built. The required hardware and software were developed in the course of this project. The three-channel signal of the magnetic field probe is obtained via the fieldmeter's analog output and is connected to the one-channel input of the spectrum analyzer. The spectra of the signals, representing the magnetic flux densities of the three orthogonal axes, are measured with a time displacement. At the end of a measurement the software calculates the resulting field out of the orthogonal components which then can be compared with reference levels. Test measurements were done to evaluate the created system. Due to the measurement error of the spectrum analyzer of  $\pm 1,5$  dB and the uncertainty of the corrections factors of  $\pm 15$  % of the magnetic field probe the total uncertainty of the created system is effected crucially. It should be noted that during the development of this system no commercial equipment for the *C.A 42* was available to perform a spectrum analysis of magnetic fields in a frequency range from 100 up to 400kHz.

## **Keywords**

Fieldmeter, Magnetic field probe, Spectrum analyzer, Magnetic flux density, reference levels

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Methoden</b>	<b>6</b>
3.1	Feldstärkemessgerät <i>Chauvin Arnoux C.A 42</i> . . . . .	6
3.1.1	Allgemein . . . . .	6
3.1.2	Weiterführende Informationen . . . . .	8
3.2	Spektrumanalysator <i>Rohde&amp;Schwarz FSH 3</i> . . . . .	12
3.2.1	Allgemein . . . . .	12
3.2.2	Weiterführende Informationen . . . . .	16
3.3	Konzept des Messsystems . . . . .	21
3.4	Hardware . . . . .	23
3.4.1	Mikrocontroller . . . . .	23
3.4.1.1	<i>Atmel ATmega8</i> . . . . .	23
3.4.1.2	<i>Atmel Evaluations-Board Version 2.0.1</i> . . . . .	25
3.4.2	USB/UART-Schnittstelle . . . . .	26
3.4.3	Schalter . . . . .	29
3.4.4	Schaltung und Aufbau . . . . .	31
3.4.4.1	Schaltung . . . . .	31
3.4.4.2	Layout und Aufbau . . . . .	34
3.4.5	Programmierung des Mikrocontrollers . . . . .	37
3.4.5.1	Allgemein . . . . .	37
3.4.5.2	Programmierung . . . . .	42
3.5	Software . . . . .	45
3.5.1	Allgemein . . . . .	45
3.5.2	Programmierung . . . . .	53
3.5.2.1	Einstellungen . . . . .	55

# Inhaltsverzeichnis

3.5.2.2	Verbindungsaufbau . . . . .	58
3.5.2.3	Export . . . . .	61
3.5.2.4	Messdatenerfassung . . . . .	63
3.5.2.5	Berechnungen und grafische Ausgabe . . . . .	63
3.6	Versuchsaufbau für die Testmessungen . . . . .	65
3.7	Analyse der Messunsicherheit . . . . .	68
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>71</b>
4.1	Ergebnisse der Testmessungen . . . . .	71
4.1.1	Einzelmessungen . . . . .	71
4.1.1.1	Messung bei "z-Position" . . . . .	72
4.1.1.2	Messung bei "x/y/z-Position" . . . . .	74
4.1.2	Kontinuierliche Messung . . . . .	76
4.1.2.1	Messung bei "z-Position" . . . . .	76
4.1.2.2	Messung bei "x/y/z-Position" . . . . .	77
4.2	Messsystem . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>81</b>
5.1	Ergebnisse der Testmessung . . . . .	81
5.2	Impedanzwandler . . . . .	81
5.3	Anzeige des Feldstärkemessgeräts <i>CA 42</i> . . . . .	82
5.4	Pegelfehler des Spektrumanalysators <i>FSH 3</i> . . . . .	84
5.5	Weitere Verbesserungsvorschläge . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>86</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>
	<b>Anhang</b>	<b>90</b>
A	Gebrauchsanweisung des Messsystems . . . . .	91
B	Kalibrierungsunterlagen der Magnetfeldsonde MF400 . . . . .	116
C	Berechnung des Spulenfaktors . . . . .	122
D	Hardware . . . . .	124
D.1	Bauteilliste . . . . .	124
D.2	Schaltplan . . . . .	125
D.3	Layout . . . . .	126
E	Tabelle - Einzelmessungen . . . . .	127
F	Tabelle - kontinuierliche Messungen . . . . .	128

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Referenzwerte der magnetischen Flussdichte . . . . .	2
2.1	Vorhandene Messgeräte . . . . .	3
2.2	Prinzipieller Aufbau des Messsystems . . . . .	4
3.1	Feldstärkemessgerät <i>Chauvin Arnoux C.A 42</i> . . . . .	7
3.2	Interne Spulenanordnung der Magnetfeldsonde <i>MF400</i> . . . . .	8
3.3	Verbindungseinstellungen am Feldstärkemessgerät <i>C.A 42</i> . . . . .	9
3.4	Kommunikation mit dem <i>C.A 42</i> über die serielle Schnittstelle . . . . .	11
3.5	Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde <i>MF400</i> . . . . .	13
3.6	Spektrumanalysator <i>Rohde&amp;Schwarz FSH3</i> . . . . .	14
3.7	Frequenzbereichseinstellungen des <i>FSH 3</i> . . . . .	15
3.8	Detektoren des <i>FSH 3</i> . . . . .	16
3.9	Messung eines Sinussignals mit dem Spektrumanalysator <i>FSH 3</i> . . . . .	19
3.10	Prinzipieller Ablauf einer Messung . . . . .	21
3.11	Prinzipieller Aufbau der Hardware . . . . .	23
3.12	Default <i>Fuse</i> -Einstellungen des <i>ATmega8</i> in <i>PonyProg</i> . . . . .	26
3.13	Entwicklungsmodul <i>UM232R (FT232R)</i> . . . . .	27
3.14	USB-Mikrocontroller Schnittstelle realisiert mit dem <i>UM232R</i> . . . . .	27
3.15	<i>MProg</i> -Software zur Programmierung des <i>FT232R</i> . . . . .	29
3.16	Elektromechanischer Schalter <i>Narda SEM133T</i> . . . . .	30
3.17	Aufbau und Innenschaltung des <i>Narda SEM133T</i> . . . . .	30
3.18	Erweitertes Blockschaltbild der Hardware . . . . .	31
3.19	Konfiguration des <i>FT232R</i> in <i>MProg</i> . . . . .	32
3.20	<i>Fuse</i> -Einstellungen des <i>ATmega8</i> bei externem 12MHz-Takt in <i>PonyProg</i> . . . . .	33
3.21	Ausgangs- und Eingangsstufe des Mikrocontrollers . . . . .	33
3.22	Steckverbindungen für ISP und Schalter <i>SEM133T</i> . . . . .	35
3.23	Bestückte Leiterplatte der Hardware . . . . .	36

## Abbildungsverzeichnis

3.24	Vorder- und Rückansicht der Hardware . . . . .	37
3.25	Abbildung der Hardware . . . . .	37
3.26	Register <i>UCSRC</i> des <i>ATmega8</i> . . . . .	40
3.27	Register <i>UCSRB</i> des <i>ATmega8</i> . . . . .	40
3.28	Register <i>TCCR1B</i> des <i>ATmega8</i> . . . . .	41
3.29	Flussdiagramm des Programms des Mikrocontrollers . . . . .	43
3.30	Flussdiagramm des Programmablaufes . . . . .	45
3.31	Ablauf der Messdatenerfassung . . . . .	47
3.32	Zeitlicher Verlauf der Messdatenerfassung . . . . .	49
3.33	Einstellungen des Messvorgangs (Gesamtmessdauer und Intervall) . . . . .	50
3.34	Referenzwerte der magnetischen Flussdichte . . . . .	53
3.35	Hauptmenü ( <i>main.fig</i> ) . . . . .	55
3.36	Kommunikationseinstellungen ( <i>setcomm.fig</i> ) . . . . .	56
3.37	Einstellung der Messparameter ( <i>setmeasurment.fig</i> ) . . . . .	56
3.38	Exporteinstellungen ( <i>setexport.fig</i> ) . . . . .	57
3.39	Einstellungen des Feldstärkemessgeräts <i>C.A 42</i> ( <i>setca42.fig</i> ) . . . . .	57
3.40	Einstellungen des Spektrumanalysators <i>FSH 3</i> ( <i>setrsfsh3.fig</i> ) . . . . .	58
3.41	Hardwareeinstellungen ( <i>setuc.fig</i> ) . . . . .	59
3.42	Aufbau des Datei-Headers . . . . .	62
3.43	Prinzipieller Aufbau der Rohdatendatei . . . . .	63
3.44	Aufbau für die Durchführung der Testmessungen . . . . .	65
3.45	"z-Position" der Magnetfeldsonde <i>MF400</i> . . . . .	67
3.46	"x/y/z-Position" der Magnetfeldsonde <i>MF400</i> . . . . .	67
4.1	Einzelmessung - Gemessene Spektren bei "z-Position" . . . . .	72
4.2	Einzelmessung bei "z-Position" - Darstellung der Messwerte . . . . .	73
4.3	Einzelmessung - Gemessene Spektren bei "x/y/z-Position" . . . . .	74
4.4	Einzelmessung bei "x/y/z-Position" - Darstellung der Messwerte . . . . .	75
4.5	Kontinuierliche Messung - Gemessene Spektren bei "z-Position" . . . . .	76
4.6	Kontinuierliche Messung bei "z-Position" - Darstellung der Messwerte . . . . .	77
4.7	Kontinuierliche Messung - Gemessene Spektren bei "x/y/z-Position" . . . . .	78
4.8	Kontinuierliche Messung bei "x/y/z-Position" - Darstellung der Messwerte . . . . .	79
4.9	Abbildung des Messsystems . . . . .	80
5.1	Operationsverstärker in Spannungsfolgerschaltung . . . . .	82
5.2	Anschluss des Analogausgangs des <i>C.A 42</i> an den Schalter <i>SEM133T</i> . . . . .	83

# Tabellenverzeichnis

3.1	Eigenschaften der Magnetfeldsonde <i>MF400</i> . . . . .	8
3.2	RS232-Einstellungen für Kommunikation mit dem <i>C.A 42</i> . . . . .	10
3.3	Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde <i>MF400</i> . . . . .	12
3.4	Messung eines Sinussignals mit dem <i>FSH3</i> - verwendete Geräte . . . . .	18
3.5	Messung eines Sinussignals mit dem <i>FSH3</i> - gemessene Effektivwerte . . . . .	19
3.6	Pegelfehler des Spektrumanalysators <i>FSH 3</i> . . . . .	19
3.7	Auszug aus dem Datenblatt des <i>ATmega8</i> . . . . .	24
3.8	Kenndaten des <i>Atmel Evaluations-Board Version 2.0.1</i> . . . . .	25
3.9	Auszug aus den Spezifikationen des <i>Narda-Schalters SEM133T</i> . . . . .	31
3.10	Belegung der Ein- und Ausgänge des <i>ATmega8</i> . . . . .	38
3.11	Einstellungen der UART-Schnittstelle des <i>ATmega8</i> . . . . .	39
3.12	Steuerbefehle für die Kommunikation mit der Hardware über VCP . . . . .	44
3.13	Zeiten der Messdatenerfassung . . . . .	50
3.14	Programmierte Matlab-Funktionen der Software . . . . .	54
3.15	Bei den Testmessungen verwendete Geräte . . . . .	65
3.16	Messunsicherheiten des Feldstärkemesssystems <i>C.A 42</i> . . . . .	68
3.17	Messunsicherheiten des entwickelten Messsystems . . . . .	69
4.1	Einzelmessung bei "z-Position" - Messwerte . . . . .	73
4.2	Einzelmessung bei "x/y/z-Position" - Messwerte . . . . .	75
4.3	Kontinuierliche Messung bei "z-Position" - Messwerte . . . . .	77
4.4	Kontinuierliche Messung bei "x/y/z-Position" - Messwerte . . . . .	79
D.1	Bauteilliste für die Bestückung der Leiterplatte . . . . .	124

# Abkürzungsverzeichnis

<i>ICNIRP</i>	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
DC	Direct Current
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FFT	Fast Fourier transform
I/O	Input/Output
IC	Integrierter Schaltkreis (englisch, integrated circuit)
ISP	In-System Programmable / In-System-Programmer
ISR	Interrupt Service Routine
PDIP	Plastic Dual In-line Package
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RMS	Effektivwert (englisch, root mean square)
RxD	Receive Data
SMA	SubMiniature-A
TxD	Transmit Data
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VCP	Virtual COM Port
VISA	Virtual Instrument Software Architecture

# Symbolverzeichnis

Symbol	Größe	Einheit
$\mu$	Magnetische Permeabilität	$[\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}\cdot\text{m}}]$
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante	$4\pi \cdot 10^{-7} [\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}\cdot\text{m}}]$
$\mu_r$	Permeabilitätszahl	[-]
$B$	Magnetische Flussdichte	$[\text{T}] = [\frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}]$
$U$	Elektrische Spannung	[V]
$f$	Frequenz	$[\text{Hz}] = [\frac{1}{\text{s}}]$
$E$	Elektrische Feldstärke	$[\frac{\text{V}}{\text{m}}]$
$H$	Magnetische Feldstärke	$[\frac{\text{A}}{\text{m}}]$
$I$	Elektrische Stromstärke	[A]
$P$	Elektrische Leistung	[W]
$R$	Elektrischer Widerstand	$[\Omega]$

# 1 Einleitung

Elektrische und magnetische Felder sind ein Bestandteil unserer Umwelt. Abgesehen von natürlichen Phänomenen, wie dem elektrischen Erdfeld und dem Erdmagnetfeld, entstehen diese Felder bei sämtlichen elektrischen Geräten. Sie können sowohl in den Geräten selbst, wie auch bei elektrischen Geräten, die sich in der näheren Umgebung befinden, zu technischen Problemen führen. Abhilfe hierbei können Maßnahmen zur Gewährleistung der Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) schaffen, die meist schon bei der Entwicklung des Systems anzuwenden sind.

Zusätzlich zu den Betrachtungen, die die EMV von Geräten betreffen, müssen auch die Auswirkungen der auftretenden elektrischen und magnetischen Felder auf Menschen Berücksichtigung finden. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass Menschen am Arbeitsplatz oder in der Freizeit nicht Feldern ausgesetzt sind, die schädliche Auswirkungen auf ihre Gesundheit haben können. Zu diesem Zweck wurden die *ICNIRP-Guidelines*<sup>1</sup> [16] und die darauf basierende Vornorm *ÖVE/ ÖNORM E 8850* [7] festgelegt. Die Einhaltung der in diesen Dokumenten festgelegten Basisgrenzwerte (*Basic restrictions*) und Referenzwerte (*Reference levels*) für die Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern soll Schutz vor bekannten schädlichen Effekten auf die Gesundheit bieten.

Eine Überschreitung der Basisgrenzwerte kann zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung führen. Bei den Basisgrenzwerten handelt es sich um physikalische Größen, die durch die Kenntnis physikalischer Gewebsparameter ermittelt werden können. Die für die Ermittlung des Grenzwerts herangezogene physikalische Größe ist abhängig von der Frequenz des auftretenden Feldes. Die Referenzwerte wurden aus den Basisgrenzwerten abgeleitet und können im Gegensatz zu den Basisgrenzwerten auch in Abwesenheit eines exponierten Körpers bestimmt werden [7].

---

<sup>1</sup>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Oberschleissheim, Germany - <http://www.icnirp.de/>

## 1 Einleitung

In Abbildung 1.1 sind die Referenzwerte für die magnetische Flussdichte  $B$ , nach [7][16], dargestellt. Es wird zwischen Referenzwerten für die Allgemeinbevölkerung und für beruflich exponierte Personen unterschieden.

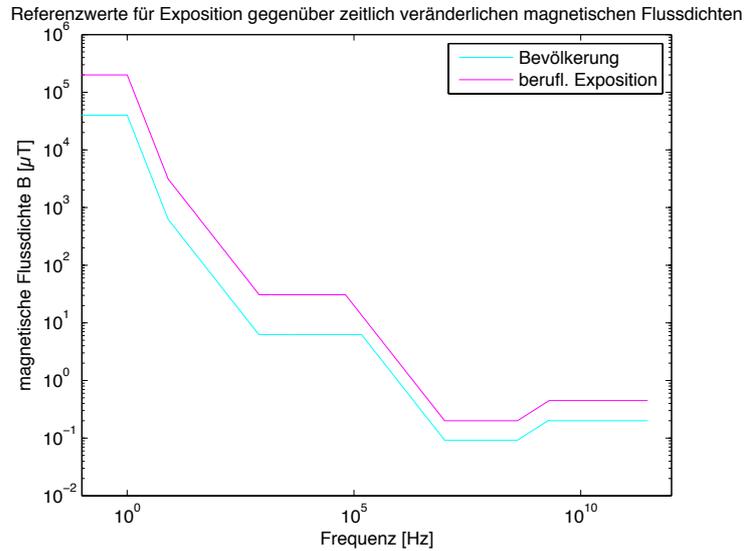


Abbildung 1.1: Referenzwerte für die Exposition gegenüber zeitlich veränderlichen magnetischen Flussdichten nach [7],[16]

Mit dem zu entwickelnden Messsystem sollen Spektren magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100kHz bis 400kHz gemessen werden können. Über die zu programmierende Software soll ein Vergleich der Messwerte mit den entsprechenden Referenzwerten möglich sein.

Durch die Entwicklung des Messsystems wird der Messbereich des verwendeten Feldstärkemessgeräts um den erwähnten Frequenzbereich erweitert. Dies wird notwendig, da es für das Feldstärkemessgerät keine kommerziell erhältliche Erweiterung für die Spektralanalyse in diesen Frequenzbereich gibt. Die Messung bis 400kHz ist aufgrund der Eigenschaften der zum Einsatz kommenden Magnetfeldsonde möglich (vgl. Abschnitt 3.1.2).

## 2 Aufgabenstellung

Im Zuge dieser Diplomarbeit sollen die Komponenten zweier Messsysteme so adaptiert werden, dass eine Messung von Spektren magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 400 kHz möglich ist.

Das Kernstück des Systems sollen zwei am *Institut für Health Care Engineering* der *TU Graz* vorhandene Messgeräte bilden. Dabei handelt es sich um das Feldstärkemessgerät *C.A 42*<sup>1</sup> mit der für die Messung magnetischer Felder geeigneten Messsonde *MF400* (vgl. Abbildung 2.1(a)), sowie um den Spektrumanalysator *FSH 3*<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 2.1(b)).



(a) Chauvin Arnoux  
C.A 42 Feldstärke-  
messgerät



(b) Rohde&Schwarz  
FSH 3 Spektumanaly-  
sator

Abbildung 2.1: Vorhandene Messgeräte

Diese beiden Messgeräte sollen durch den Einsatz von Hard- und Software so kombiniert werden, dass es möglich ist, Spektren magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 400 kHz zu messen.

Das Feldstärkemessgerät *C.A 42* misst über die angeschlossene Messsonde *MF400* die magnetische Flussdichte in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen. Mittels FFT

<sup>1</sup>Groupe Chauvin Arnoux, Paris , Frankreich - <http://www.chauvin-arnoux.com>

<sup>2</sup>Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München, Deutschland - <http://www.rohde-schwarz.com>

## 2 Aufgabenstellung

kann das Messgerät eine Spektralanalyse bis 91 kHz durchführen [6]. Da die Magnetfeldsonde bis 400 kHz kalibriert wurde [14], ist auch eine Spektralanalyse bis in diesen Frequenzbereich möglich. Für diese Aufgabe wird der Spektrumanalysator *FSH 3* herangezogen, mit dem Signale im Frequenzbereich von 100kHz bis 3GHz [18] analysiert werden können.

Die drei von der Magnetfeldsonde gemessenen Signale werden über Signalausgänge am Feldstärkemessgerät abgegriffen und sollen vom Spektrumanalysator, der nur einen Signaleingang besitzt, analysiert werden.

Um alle drei Kanäle auswerten zu können, muss an der Schnittstelle zwischen den beiden Messgeräten eine Hardware (vgl. Abbildung 2.2) platziert werden, die die einzelnen Kanäle wechselweise an den Spektrumanalysator schaltet. Die gemessenen Spektren sollen im Anschluss an einen PC übertragen werden, wo mit Hilfe der zu entwickelnden Software die Berechnung des resultierenden Spektrums (Ersatzgröße) erfolgt.

Zur Überprüfung des Messsystems soll mit einem geeigneten Prüfaufbau eine Testmessung durchgeführt werden.

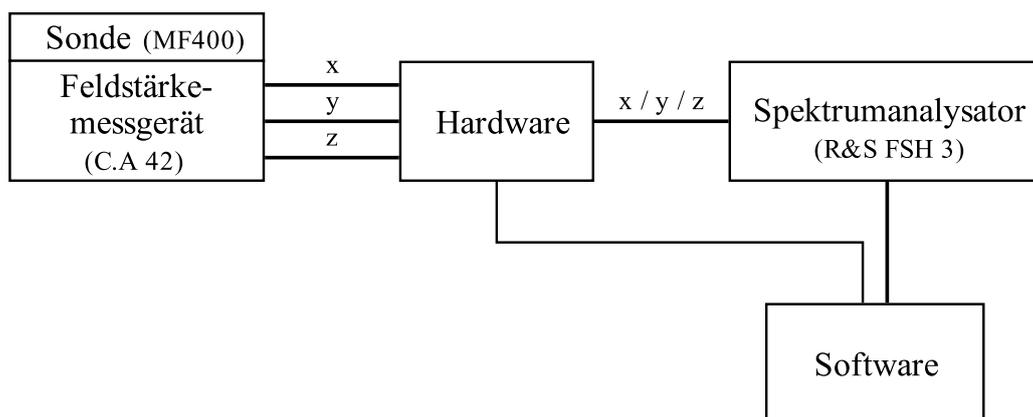


Abbildung 2.2: Prinzipieller Aufbau des Messsystems

Die Anforderungen an die Hardware wurden im Pflichtenheft wie folgt definiert:

- Die entwickelte Hardware soll in einem kompakten Gehäuse untergebracht werden, dabei ist eine Abschirmung der Elektronik vorzusehen um mögliche Beeinflussungen der Messwerte zu verhindern.
- Es soll möglich sein, jeweils einen der drei mit dem *C.A 42* gemessenen Feldvektoren auszuwählen und die Messwerte an das *FSH 3* zu übermitteln.

## 2 Aufgabenstellung

- Es soll angezeigt werden, welche der drei Raumachsen gerade ausgewählt ist.
- Zur Steuerung der Hardware sollte vorzugsweise die USB-Schnittstelle verwendet werden, über die nach Möglichkeit auch die Spannungsversorgung bereitgestellt wird.

Die zu entwickelnde Software muss neben den erforderlichen Berechnungen auch die Steuerung der Hardware sowie des gesamten Messablaufs übernehmen. Die genauen Anforderungen an die Software wurden im Pflichtenheft wie folgt definiert:

- Lauffähig unter *Windows XP*<sup>3</sup>.
- Implementierung in *Matlab*<sup>4</sup> oder *LabVIEW*<sup>5</sup>
- Steuerung der Hardware zur Auswahl eines Raumvektors, sowie dem Einlesen der berechneten Spektren für die einzelnen Raumrichtungen.
- Mindestens die folgenden Parameter sollen einstellbar sein: Gesamtmessdauer, Start und Ende der Messung als absolute Uhrzeit und Messdauer der einzelnen Achsen.
- Es soll möglich sein, ein resultierendes Einzelspektrum (Ersatzgröße) zu messen.
- Die Software soll kontinuierlich das resultierende Spektrum berechnen und zum Abschluss der Messung, das über die Messdauer gemittelte Spektrum, am Bildschirm ausgeben.
- Etwaige Referenzwertüberschreitungen sollen angezeigt werden.
- Die Messparameter (Datum, Uhrzeit, Messdauer, etwaige Programm- und Geräteeinstellungen) sollen zusammen mit den resultierenden Spektren gespeichert werden.
- Die Rohdaten der gesamten Messung sollen in einer Textdatei gespeichert werden.

---

<sup>3</sup>Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA - <http://www.microsoft.com>

<sup>4</sup>The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA - <http://www.mathworks.com>

<sup>5</sup>National Instruments Corp., Austin, Texas, USA - <http://www.ni.com/labview/>

# 3 Methoden

Die Entwicklung des Messsystems und der damit verbundenen Hard- und Software setzt genaue Kenntnisse der verwendeten Messgeräte und Komponenten voraus. Deshalb wurden vor Entwicklungsbeginn das Feldstärkemessgerät *C.A 42* und der Spektrumanalysator *FSH 3* genau analysiert, sowie deren Eigenschaften, die in Bezug auf das Messsystem relevant sind, untersucht. Im Anschluss an den Entwurf eines Konzepts erfolgte sukzessiv der Aufbau von Hard- und Software. Nach dem Abschluss der Arbeiten wurde eine Testmessung durchgeführt, um die Funktion des erstellten Systems zu überprüfen.

Im folgenden Kapitel wird schrittweise die Entwicklung des Messsystems, ausgehend von den beteiligten Messgeräten, beschrieben.

## 3.1 Feldstärkemessgerät *Chauvin Arnoux C.A 42*

### 3.1.1 Allgemein

Das *C.A 42* (vgl. Abbildung 3.1), der Firma *Chauvin Arnoux*, ist ein Feldstärkemessgerät für die Messung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder im Frequenzbereich von 10 Hz bis 400 kHz. Die erfassten Messwerte können mit verschiedenen, im Messgerät gespeicherten, Referenzwerten (z.B. *ICNIRP Guidelines* [16], etc.) verglichen werden. Die in diesem Abschnitt angegebenen Informationen wurden der Bedienungsanleitung des Feldstärkemessgeräts [6] entnommen.

Für die Darstellung der Messergebnisse besitzt das Feldstärkemessgerät vier verschiedene Betriebsarten. Neben der Anzeige des momentan gemessenen Effektiv- oder Spitzenwerts und dem Vergleich dieses Messwerts mit Referenzwerten, besitzt das Messgerät eine Oszilloskop-Funktion für die Darstellung des zeitlichen Feldverlaufs und einen FFT-Modus zur Spektralanalyse bis 91kHz.



Abbildung 3.1: Feldstärkemessgerät *Chauvin Arnoux C.A 42*

Über die mitgelieferte Software *Log 42*<sup>1</sup> lassen sich Messwerte und Daten zum PC übertragen. Dafür muss das Messgerät über die serielle Schnittstelle mit dem PC verbunden werden.

#### **Messung elektrischer Felder**

Die Messung elektrischer Felder erfolgt über die externe isotrope Messsonde *EF400*. Sie besitzt einen internen Akkumulator für die Spannungsversorgung und wird über einen Lichtwellenleiter mit dem Messgerät verbunden. Die kugelförmige Messsonde kann das elektrische Feld in den drei aufeinander normalen Raumachsen erfassen. Die Messung der Feldkomponenten erfolgt über drei orthogonal angeordnete Antennen im inneren der Sonde.

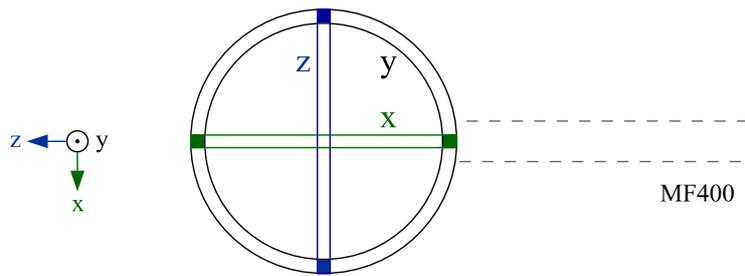
#### **Messung magnetischer Felder**

Die Messung magnetischer Felder kann entweder über die interne (10Hz bis 30kHz) oder über eine extern anschließbare isotrope Messsonde erfolgen. Einige Eigenschaften der Magnetfeldsonde *MF400* (10Hz bis 400kHz) sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Sie wurde für Messungen im Frequenzbereich bis 400 kHz kalibriert [14] (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Die Magnetfeldsonde *MF400* misst die magnetische Flussdichte in drei aufeinander normalen Raumrichtungen. Dabei werden die Feldkomponenten durch drei orthogonal angeordnete Induktionsspulen (vgl. Abbildung 3.2) gemessen. Die in den Spulen induzierten Spannungen werden digitalisiert und anschließend im Messinstrument weiterverarbeitet.

---

<sup>1</sup>Groupe Chauvin Arnoux, Paris , Frankreich - <http://www.chauvin-arnoux.com>

Abbildung 3.2: Interne Spulenanordnung der Magnetfeldsonde *MF400* nach [6]

Es besteht auch die Möglichkeit, diese Spannungen direkt und unverarbeitet über den Analogausgang des Messgeräts auszulesen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Magnetfeldsonde *MF400* sechs Messbereiche besitzt (vgl. Tabelle 3.1). Alleine anhand der gemessenen Spannung am Analogausgang lässt sich nicht feststellen in welchem Messbereich und somit in welcher Größenordnung die dem gemessenen Signal entsprechende magnetische Flussdichte liegt. Bei Nutzung des Analogausganges ist somit eine Quantifizierung nur unter Kenntnis des aktuellen Messbereichs möglich.

<b>Isotropic Probe</b>	<i>MF400</i>
<b>Measurement</b>	Magnetic Field
<b>Equivalent area</b>	100cm <sup>2</sup>
<b>Frequency range to 3dB down (Without filter)</b>	10Hz to 400kHz
<b>Measurement dynamic range</b>	10nT to 20mT
<b>Measurement scales</b>	200nT / 2.0 / 20 / 200μT / 2.0 / 20mT
<b>Accuracy</b>	±3% ±4 digits
<b>Temperature drift</b>	±1%
<b>Band-Pass Filters</b>	+1200 - 2000Hz
<b>Power Supply</b>	none
<b>Dimensions</b>	425 x 35 / 118mm
<b>Length of cable</b>	1m
<b>Mass</b>	400g

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Magnetfeldsonde *MF400* (Auszug aus der Bedienungsanleitung des *C.A 42* [6])

### 3.1.2 Weiterführende Informationen

Das zu entwickelnde Messsystem basiert auf der Nutzung des Analogausgangs des Feldstärkemessgeräts. Dieser dreikanalige Ausgang, der nur bei Verwendung der Magnet-

feldsonde *MF400* verwendet werden kann, führt je nach Softwareeinstellung entweder das durchgeschliffene Spannungssignal der Sonde oder ein vom Messgerät normiertes Signal.

Da das normierte Signal des Feldstärkemessgeräts durch die Vorverarbeitung auf Frequenzen bis 30 kHz begrenzt ist [6], kann für das Messsystem nur das durchgeschliffene Sondensignal verwendet werden.

Um aus dem Spannungssingal eine das Magnetfeld beschreibende Größe zu erhalten, wird eine Umrechnungsformel benötigt. Die erforderlichen Daten wurden vom Gerätehersteller zur Verfügung gestellt und werden nachfolgend beschrieben.

#### Serielle Schnittstelle

Damit eine entsprechende Umrechnung erfolgen kann, werden einige interne Parameter des Feldstärkemessgeräts *C.A 42* benötigt. Diese können nach einem Firmwareupdate des Messgeräts (auf Version 1.12) über die serielle Schnittstelle ausgelesen werden.

Um eine Verbindung zwischen dem Feldstärkemessgerät und dem PC aufbauen zu können, müssen folgenden Einstellungen getroffen werden.



Abbildung 3.3: Verbindungseinstellungen am Feldstärkemessgerät *C.A 42*

Am *C.A 42* wird die Taste *Menü* gedrückt und das Untermenü *Options>System* geöffnet (vgl. Abbildung 3.3). Hier kann die gewünschte Baudrate und eine Datenflusskontrolle per Handshake eingestellt werden. Die serielle Schnittstelle des PC muss mit den in Tabelle 3.2 angeführten Einstellungen konfiguriert werden.

### 3 Methoden

<b>Port</b>	COM# <sup>1</sup>
<b>Baudrate</b>	4800 bis 57600 Baud <sup>2</sup>
<b>Datenbits</b>	8
<b>Parität</b>	keine
<b>Stopbit(s)</b>	1
<b>Datenflusskontrolle</b>	keine, Xon/Xoff oder RTS/CTS <sup>2</sup>
<b>Terminator<sup>3</sup></b>	CR - Carriage Return <sup>4</sup>

<sup>1</sup> COM# kennzeichnet den Port mit dem das Feldstärkemessgerät verbunden ist

<sup>2</sup> Abhängig von Einstellung am *C.A 42*

<sup>3</sup> Steuerzeichen das die Datenübertragung beendet " \n "

<sup>4</sup> Steuerzeichen des ASCII-Zeichensatzes, Dezimal: 13

Tabelle 3.2: Einstellung der seriellen Schnittstelle für Kommunikation mit dem *C.A 42*

Um die Kommunikation des Messgeräts mit dem PC testen zu können, wurde das in *Windows XP* enthaltene Kommunikationsprogramm *HyperTerminal*<sup>2</sup> verwendet.

Wird über die serielle Schnittstelle der Befehl *send x|n* an das Messgerät gesendet, wobei *|n* den Abschluss des Befehls kennzeichnet (vgl. Tabelle 3.2), so antwortet das *C.A 42* mit dem folgenden Datensatz:

```
V 17.3 68.9 11.4 71.9 103v;0.01...30kHz
v [1] [2] [3] [4] [5][6][7][8]; [9]
```

Auf den Befehl *send S|n* antwortet das Messgerät mit dem erweiterten Datensatz:

```
V 11.0 79.6 12.0 81.2 103v;0.01...30kHz;MF400;0340;2000e-10;0;
v [1] [2] [3] [4] [5][6][7][8]; [9] ; [10] ; [11] ; [12] ;[13];
16384;16384;16384;0;0;0
[14] ; [15] ; [16] ;[17];[18];[19]
```

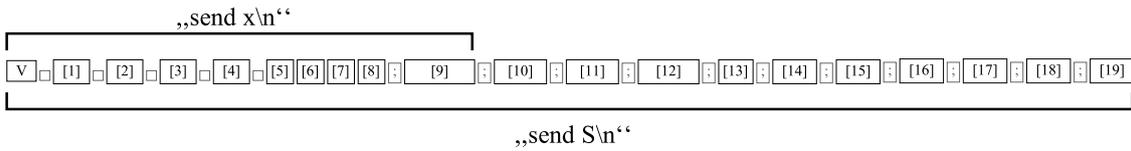
Der Aufbau dieser beiden Datensätze ist in Abbildung 3.4 beschrieben.

#### Umrechnungsformel

Anhand der gemessenen Analogspannung  $U_{\text{Achse}}$  und der im Datensatz enthaltenen Informationen lässt sich die magnetische Flussdichte  $B_{\text{Achse}}$  bestimmen. Diese Berechnung muss für das Signal jeder Achse separat durchgeführt werden. Die Parameter Offset  $\text{off}_{\text{Achse}}$  und Normierungsfaktor  $\text{norm}_{\text{Achse}}$  des Datensatz weisen einen achsspezifischen Wert auf. Der Messbereichsendwert  $\text{mbew}$  ist für alle Achsen gleich und gibt Aufschluss über den momentanen Messbereich.

<sup>2</sup>Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA - [http://technet.microsoft.com/de-de/library/cc736511\(WS.10\).aspx](http://technet.microsoft.com/de-de/library/cc736511(WS.10).aspx)

### 3 Methoden



Trennzeichen: Leerzeichen □ und Semikolon ;

[1] ... X-Wert	[6] ... Messwertdarstellung	[10] ... Sondenname	[15] ... Normierungsfaktor Y
[2] ... Y-Wert	[7] ... Messwertfilter Nr.	[11] ... Serien Nr.	[16] ... Normierungsfaktor Z
[3] ... Z-Wert	[8] ... Messwertstatus	[12] ... Messbereichsendwert	[17] ... Offset X
[4] ... Summen-Wert	[9] ... Filtername	[13] ... Analogausgang norm.	[18] ... Offset Y
[5] ... Messbereich	[14] ... Normierungsfaktor X	[19] ... Offset Z	

Abbildung 3.4: Kommunikation mit dem *C.A 42* über die serielle Schnittstelle

Abhängig von der Einstellung *Analogausgang normiert*, die am Feldstärkemessgerät getroffen werden kann, erfolgt die Wahl einer bestimmten Berechnungsformel (3.1) bzw. (3.2).

- *Analogausgang normiert* = 1

$$B_{Achse} = U_{Achse} \cdot \frac{mbew}{2 \cdot 1 V} \quad (3.1)$$

- *Analogausgang normiert* = 0

$$B_{Achse} = \left( U_{Achse} - \frac{off_{Achse}}{2048} \cdot 1,25V \right) \cdot \left( \frac{norm_{Achse}}{10000 \cdot 1V} \right) \cdot mbew \quad (3.2)$$

**Anmerkung:** (3.1) bzw. (3.2) wurden vom Gerätehersteller zur Verfügung gestellt.

#### Kalibrierung der Messsonde *MF 400*

Die Kalibrierung der Magnetfeldsonde *MF 400* wurde vom *Österreichischen Kalibrierdienst* durchgeführt. Nachfolgend sind die wichtigsten in den Kalibrierungsunterlagen [14] (vgl. Anhang Seite 116) enthaltenen Informationen zusammengefasst.

Um einen korrekten Messwert (*actual*) zu erhalten, muss der am Messgerät angezeigte Wert (*instrument reading*) mit dem entsprechenden linearen Korrekturfaktor (*linear correction factor*) multipliziert werden (3.3).

$$\text{instrument reading} \times \text{linear correction factor (c.f.)} = \text{actual (T)} \quad (3.3)$$

Die Werte der Korrekturfaktoren bei den entsprechenden Frequenzen können Tabelle 3.3 entnommen werden. Allerdings muss beachtet werden, dass das für die Kalibrierung erzeugte magnetische Feld (10kHz - 400kHz) eine maximale Messunsicherheit von  $\pm 15\%$  aufweisen kann.

Frequency [kHz]	c.f. linear	Frequency [kHz]	c.f. linear
10	1,05	90	1,03
20	1,04	100	1,03
30	1,04	150	1,06
40	1,04	200	1,09
50	1,03	250	1,15
60	1,04	300	1,22
70	1,03	350	1,34
80	1,03	400	1,48

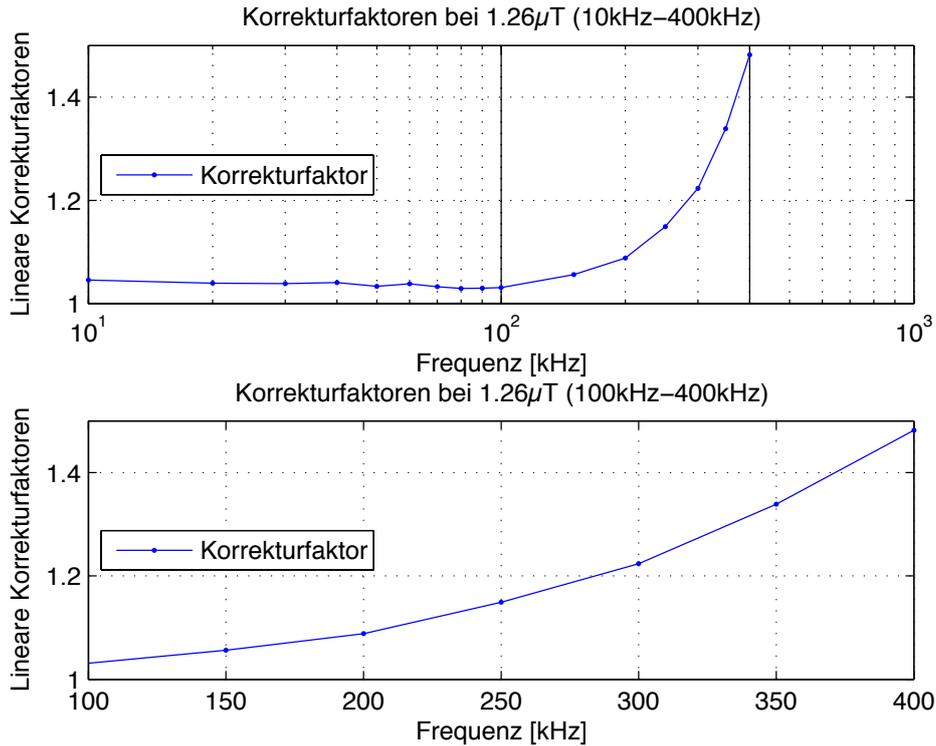
Tabelle 3.3: Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* bei  $1,26 \mu\text{T}$  nach [14]

Abbildung 3.5 stellt diese Korrekturfaktoren grafisch dar. Da der Bereich von 100 kHz bis 400 kHz für das Messsystem von besonderem Interesse ist, wurde er speziell hervorgehoben.

## 3.2 Spektrumanalysator *Rohde&Schwarz FSH 3*

### 3.2.1 Allgemein

Spektrumanalysatoren, die nach dem FFT-Prinzip arbeiten, nutzen Methoden der digitalen Signalverarbeitung. Durch die begrenzte Amplitudenaufösung der verwendeten Analog-Digital-Wandler, entsteht bei der Digitalisierung ein gewisser Fehler, der als Quantisierungsfehler bezeichnet wird. Um diesen Fehler möglichst gering zu halten, werden Analog-Digital-Wandler mit hoher Amplitudenaufösung verwendet, die jedoch eine begrenzte Bandbreite aufweisen und dadurch die maximale Eingangsfrequenz begrenzen. Daher können FFT-Analysatoren nur für die Messung niederfrequenter Signale eingesetzt werden. Für die Analyse höherfrequenter Signale können Messgeräte verwendet werden, die nach dem Überlagerungsprinzip arbeiten. Im Gegensatz zu den FFT-Analysatoren wird das Spektrum nicht aus dem zeitlichen Verlauf des Signals ermittelt, sondern direkt im Frequenzbereich bestimmt. Dabei muss das Eingangsspektrum in seine einzelnen Komponenten zerlegt werden. Das zu analysierende Signal wird mit einem Mischer auf

Abbildung 3.5: Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* nach [14]

eine bekannte Zwischenfrequenz umgesetzt und an einem feststehenden Bandpassfilter vorbeigeschoben. Die gefilterten Signale werden anschließend als Spektrum dargestellt [17].

Der Spektrumanalysator *FSH 3*, der Firma *Rohde&Schwarz* (Abbildung 3.6), arbeitet nach dem Überlagerungsprinzip und eignet sich für die Frequenzanalyse von Signalen im Frequenzbereich von 100 kHz bis 3 GHz.

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Funktionen des Messgeräts angegeben. Die Informationen wurden dem Bedienhandbuch des Spektrumanalysators [18] entnommen.

### Eingänge

Der Spektrumanalysator besitzt einen HF-Eingang, über den dem Messgerät das zu analysierende Signal zugeführt werden kann. Es muss darauf geachtet werden, dass die maximal zugelassene Dauerleistung am Eingang von 100 mW nicht überschritten wird. Eine Überlastung des Eingangs kann zur Erwärmung des Geräts führen und einen irreversiblen Schaden zur Folge haben.



Abbildung 3.6: Spektrumanalysator *Rohde&Schwarz FSH3*

Durch den Triggeranschluss am Messgerät lässt sich die Messung durch ein externes Signal starten. Die Triggerschwelle ist an jene von TTL-Signalen angelehnt.

#### **RS232**

Über die mitgelieferte Software *FSH View*<sup>3</sup> wird die Übertragung von gemessenen Spektren ermöglicht. Für die Kommunikation ist eine optische RS-232-C Schnittstelle vorhanden, die über ein spezielles Verbindungskabel mit der RS232-Schnittstelle des PC verbunden werden kann. Durch die optische Verbindung wird eine eventuelle Beeinflussung der Messung durch Störungen verhindert. Für die Datenübertragung sind Baudraten im Bereich von 9600 bis 115200 Baud einstellbar.

#### **Frequenzbereich**

Die Auswahl des zu untersuchenden Frequenzbereichs kann am Spektrumanalysator *FSH 3* auf zwei verschiedene Arten erfolgen (vgl. Abbildung 3.7). Einerseits durch Wahl einer bestimmten Mittenfrequenz (*Center Freq.*) und anschließender Wahl des Frequenzdarstellungsbereichs (*Span*) oder durch Festlegen der Start- und Stoppfrequenz (*Start/Stop Freq.*) .

#### **Anzeigeeinheit**

Für die Anzeige der Amplitude des gemessenen Spektrums stehen sowohl logarithmische als auch lineare Einheiten zur Verfügung:

- [dBm] - Leistungspegel mit der Bezugsgröße 1 mW

---

<sup>3</sup>Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München, Deutschland - <http://www.rohde-schwarz.com>

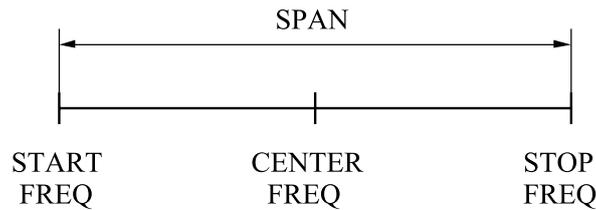


Abbildung 3.7: Frequenzbereichseinstellungen des *FSH 3*

- [dBmV] - Spannungspegel mit der Bezugsgröße 1 mV
- [dB $\mu$ V] - Spannungspegel mit der Bezugsgröße 1  $\mu$ V
- [V] - Elektrische Spannung
- [W] - Elektrische Leistung

### Detektor

Intern misst der Spektrumanalysator *FSH 3* das gesamte Spektrum lückenlos. Für die Anzeige der Messkurve am Display stehen jedoch nur 301 Datenpunkte auf der Frequenzachse zur Verfügung. Um einen Informationsverlust zu vermeiden, muss das Spektrum auf diese 301 Punkte komprimiert werden. Jeder Datenpunkt steht somit für einen Frequenzbereich, der durch (3.4) bestimmt ist.

$$\frac{\text{Span}}{301} = \frac{\text{StopFreq} - \text{StartFreq}}{301} \quad (3.4)$$

Abhängig vom ausgewählten Detektor wird somit für jeden dieser Frequenzbereiche ein repräsentativer Wert gewählt. Der Spektrumanalysator *FSH 3* bietet die folgenden Detektoren (vgl. Abbildung 3.8) zur Auswahl an:

- **Auto Peak** - Für jeden Datenpunkt wird der Minimal- und der Maximalwert des Frequenzbereichs bestimmt und am Display dargestellt. Nur bei diesem Detektor besitzt die Messkurve 602 Messwerte (zwei für jeden Datenpunkt).
- **Max. Peak** - Hier wird im Gegensatz zum Auto-Peak-Detektor nur der Maximalwert des Frequenzbereichs angegeben.
- **Min. Peak** - In diesem Fall liefert der Detektor den Minimalwert des Frequenzbereichs.

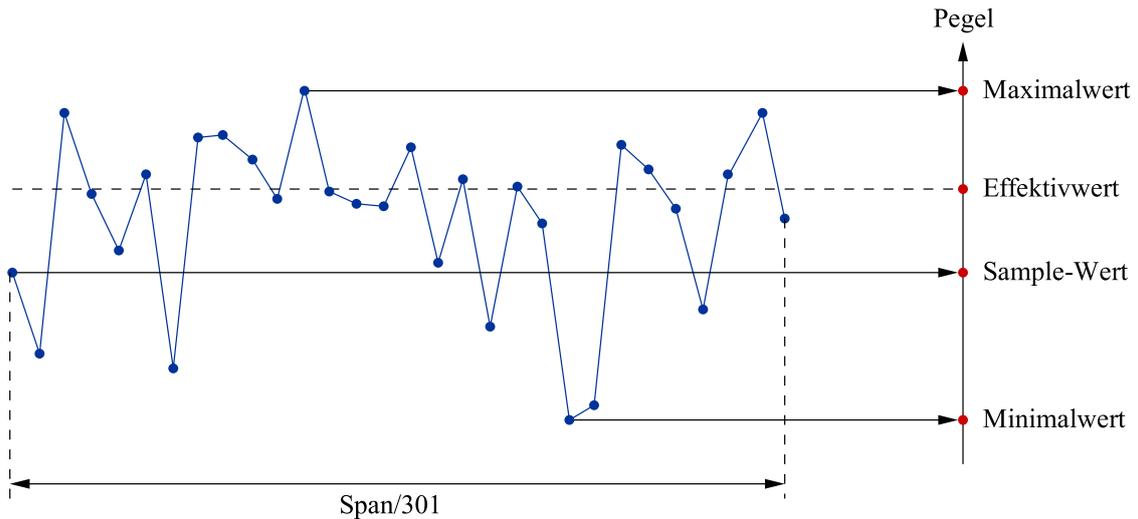


Abbildung 3.8: Detektoren des *FSH 3* nach [18]

- **Sample** - Bei diesem Detektor erfolgt keine Zusammenfassung des Frequenzbereichs des Datenpunktes. Es wird ein beliebiger Messpunkt innerhalb des Frequenzbereichs ausgewählt und angezeigt.
- **RMS** (Effektivwert) - Dieser Detektor misst den Effektivwert innerhalb eines Pixels.

### Sweepzeit (*Sweeptime*)

Im allgemeinen ist die Sweepzeit jene Zeit, die der Spektrumanalysator benötigt, um das Spektrum zu messen. Sie ist unter anderem vom eingestellten Frequenzdarstellbereich (*Span*) abhängig. Im Automatikbetrieb erfolgt die Wahl der kürzest möglichen Sweepzeit für eine richtige Anzeige der Spektren von Sinussignalen. Für einen Frequenzdarstellbereich von 300kHz (100kHz bis 400kHz) beträgt sie 167ms.

## 3.2.2 Weiterführende Informationen

### Maximale Eingangsspannung

Um den HF-Eingang des Spektrumanalysators nicht zu überlasten, muss sichergestellt

werden, dass der von der Sonde ausgegebene Spannungspegel keinen schädigenden Einfluss hat. Bei einer maximalen Dauerleistung  $P_{\max}$  von  $100\text{mW}$  ergibt sich bei einem Eingangswiderstand  $R$  von  $50\Omega$ , nach (3.5), eine maximale Eingangsspannung  $U_{\text{HF,max}}$  am HF-Eingang von:

$$P = \frac{U^2}{R} \rightarrow U_{\text{HF,max}} = \sqrt{100 \text{ mW} \cdot 50 \Omega} = 2,236 \text{ V} \quad (3.5)$$

Bei Aktivierung des normierten Ausgangssignals am Feldstärkemessgerät wird bei einer Anzeige von *Full-Scale* ein Spannungssignal von  $1\text{V}$  ausgegeben [6]. Messungen haben gezeigt, dass bei Verwendung des durchgeschliffenen SONDENSIGNALS (*Analogausgang normiert* = 0) die Spannungspegel wesentlich niedriger liegen (Faktor  $\sim \frac{1}{3}$ ) und es somit zu keiner Überlastung des HF-Eingangs kommt.

#### Umrechnung der Anzeigeeinheit

Zwischen den verschiedenen Einheiten, in denen die Amplitude des gemessenen Spektrums angezeigt wird, kann mit Hilfe von (3.6) bis (3.9) umgerechnet werden:

$$P_{\text{dBm}} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{\text{W}}}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3.6)$$

$$U_{\text{dBmV}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_{\text{V}}}{1 \text{ mV}} \right) \quad (3.7)$$

$$U_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_{\text{V}}}{1 \mu\text{V}} \right) \quad (3.8)$$

$$P_{\text{W}} = \frac{(U_{\text{V}})^2}{R} \text{ mit } R = 50 \Omega \quad (3.9)$$

#### VISA

Wie bereits erwähnt, funktioniert die Kommunikation des Spektrumanalysators *FSH 3* mit dem PC üblicherweise über das Programm *FSH View*. Dennoch wird von *Rohde&Schwarz* ein Treiber bereitgestellt, mit dem das Messgerät auch ohne diese Software angesprochen werden kann. Dafür ist die Installation eines Drivers (*VXIplug&play*

*Instrument Driver*) erforderlich. Dieser kann von der Website des Geräteherstellers heruntergeladen werden und bietet eine Bibliothek mit Befehlen [15], um das Messgerät, mit Hilfe verschiedener Programmiersprachen, steuern zu können.

Voraussetzung ist jedoch die Installation der *VISA* Run-Time Engine der Firma *National Instruments*. *VISA* stellt dabei die Schnittstelle zwischen der anzusprechenden Hardware und der verwendeten Entwicklungsumgebung dar [3].

Um das Messgerät über *Matlab* ansprechen zu können, muss ein eigener *Matlab VXIplug&play Instrument Driver* erstellt werden. Dies kann nach erfolgter Installation der zuvor erwähnten Komponenten geschehen. Der genaue Ablauf wird in Abschnitt 3.5.2.2 beschrieben.

#### Messung eines Sinussignals

Um die Anzeige des Spektrumanalysators analysieren zu können, wird ein Sinussignal mit einem definierten Pegel bei zwei Frequenzen gemessen. Das Signal wird dabei über einen Funktionsgenerator eingespeist und die Kontrolle des Spannungspegels erfolgt über ein zum Spektrumanalysator parallel geschaltetes Oszilloskop. Die bei der Messung verwendeten Geräte sind in Tabelle 3.4 angeführt.

Gerät	Bezeichnung
Funktionsgenerator	<i>Hameg HMF2250</i>
Oszilloskop	<i>Tektronix TPS2023</i>
Spektrumanalysator	<i>Rohde&amp;Schwarz FSH 3</i>

Tabelle 3.4: Beim Messaufbau verwendete Geräte

Mit Hilfe des Digitaloszilloskops wurde das Spektrum mittels FFT bestimmt. Am Frequenzanalysator erfolgte ebenfalls die Aufzeichnung des Spektrums. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Die gemessenen Effektivwerte wurden bei den entsprechenden Frequenzen direkt aus dem Spektrum abgelesen und in Tabelle 3.5 eingetragen.

Ein Vergleich der Effektivwerte zeigt deutliche Unterschiede der Amplituden in den gemessenen Spektren (vgl. Abbildung 3.9 und Tabelle 3.5). Für die Wahl der *Sweepzeit* des *FSH 3* wurde der Automatikbetrieb gewählt. Eine Verlängerung dieser Zeitdauer hatte keinen Einfluss auf den Pegelfehler, jedoch wurde der Fehler in der Frequenzanzeige beim 200kHz-Signal verringert. Der relativ große Fehler von 1kHz kommt durch die Reduzierung auf 301 Datenpunkte zu Stande (vgl. Abschnitt 3.2.1).

### 3 Methoden

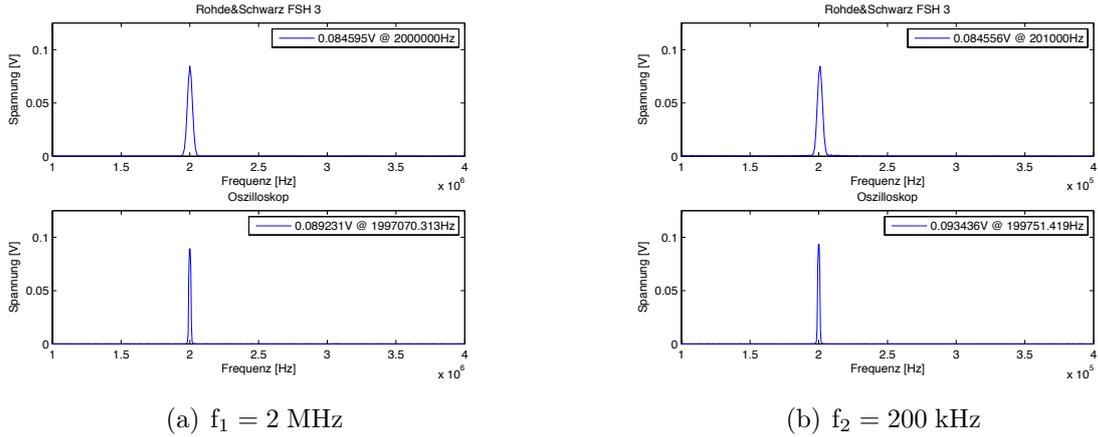


Abbildung 3.9: Messung eines Sinussignals mit dem Spektrumanalysator *FSH 3*

Spektrumanalysator		Oszilloskop		
Frequenz	Effektivwert	Frequenz	Effektivwert	Frequenz
[Hz]	[mV]	[Hz]	[mV]	[Hz]
2e6	84,6	2e6	89,23	1,997e6
200e3	84,56	201e3	93,44	199,75e3

Tabelle 3.5: Gemessene Effektivwerte

Die Amplitude des Peaks der Oszilloskopmessung entspricht den theoretischen Überlegungen für ein auf den Effektivwert bezogenes Spektrum eines Sinussignals. Aufgrund dieser Tatsache erfolgte nun die Bestimmung des Anzeigefehlers des Spektrumanalysators *FSH 3*. Der Anzeigefehler in [dB] (Pegelfehler) wurde mit (3.10) bestimmt. Dabei sind die Peaks der Spektren der beiden Messgeräte ( $U_{f,OSZI}$ ,  $U_{f,FSH3}$ ) verglichen worden.

$$\text{Anzeigefehler}_{\text{dB}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_{f,OSZI}}{U_{f,FSH3}} \right) \quad (3.10)$$

Frequenz	Errechneter Pegelfehler	Angabe laut Bedienhandbuch[18]
2 MHz	0.4634 dB	<1,5dB (typ. 0,5dB) bei 1MHz bis 10MHz
200 kHz	0.8674 dB	keine Angabe

Tabelle 3.6: Pegelfehler des Spektrumanalysators *FSH 3*

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst. Für das Sinussignal bei 2MHz liegt der Pegelfehler der Anzeige im spezifizierten Bereich. Für Frequenzen

### 3 Methoden

unter 1MHz wird vom Hersteller kein Fehler spezifiziert. Laut Erfahrungswerten des Herstellers liegt er im Bereich von 1,5dB.

Eine erneute Bestimmung des Pegelfehlers ergab andere Werte die jedoch im Bereich der Herstellerangaben liegen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass der auftretende Pegelfehler nicht konstant ist und einer gewissen Schwankung unterliegt. Dadurch ist es nicht möglich anhand der Pegelfehler der einzelnen Frequenzmesspunkte eine Kurve zu erstellen um damit eine Messwertkorrektur durchzuführen.

### 3.3 Konzept des Messsystems

Bevor mit der Entwicklung der Hard- und Software begonnen werden konnte, erfolgte die Planung des prinzipiellen Aufbaus und der Struktur des Messsystems. Dabei wurden die aus der Analyse der Messgeräte gewonnenen Informationen und das Pflichtenheft (vgl. Kapitel 2) miteinbezogen.

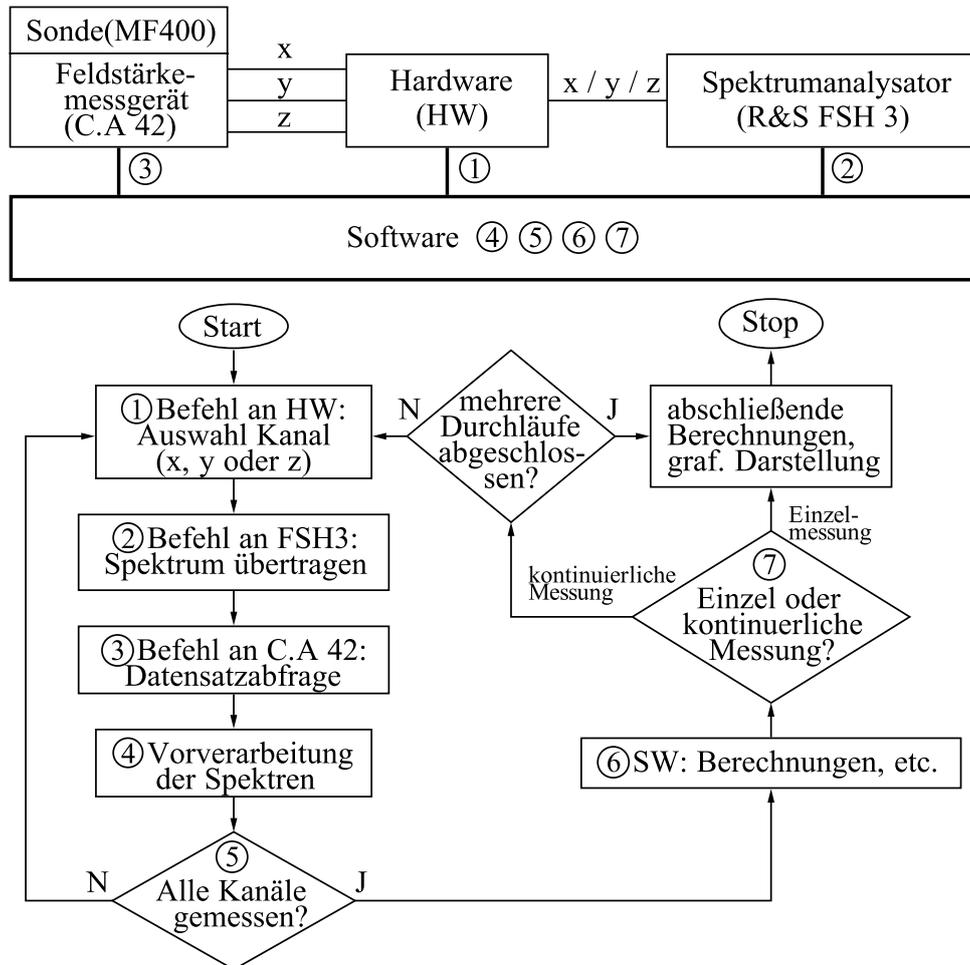


Abbildung 3.10: Prinzipieller Ablauf einer Messung

Die Messung setzt sich aus der Datenerfassung, anschließenden Berechnungen und Darstellung zusammen. Prinzipiell soll der Messvorgang nach folgendem Schema ablaufen (vgl. Abbildung 3.10):

1. Die Software schickt ein Steuersignal an die Hardware um einen Kanal auszuwählen. Nach erfolgtem Schaltvorgang besteht eine direkte Verbindung vom gewähl-

- ten Kanal des Analogausgangs des Feldstärkemessgeräts, über die Hardware zum Spektrumanalysator, der mit der Bestimmung des Spektrums beginnen kann.
2. Nach Ablauf der Sweepzeit (vgl. Abschnitt 3.2.1) kann das Spektrum des gewählten Kanals über die Software aus dem Spektrumanalysator ausgelesen werden.
  3. Um das gemessene Spektrum quantifizieren zu können, werden Daten zum aktuellen Messbereich der Sonde benötigt. Diese Informationen können über die serielle Schnittstelle aus dem Feldstärkemessgerät ausgelesen werden (vgl. Abbildung 3.4).
  4. Bevor die Messdatenerfassung eines weiteren Kanals durchgeführt werden kann, erfolgt eine rasche Vorverarbeitung des Spektrums. Das gemessene Signal wird mit Hilfe der Umrechnungsformel (3.2) in die magnetische Flussdichte umgerechnet, wobei die Kalibrierungsfaktoren der Magnetfeldsonde (vgl. Abschnitt 3.1.2) miteinbezogen werden.
  5. Für die verbleibenden Kanäle werden die Schritte (1) bis (4) wiederholt.
  6. Nach Messung aller Kanäle wird aus den orthogonalen Komponenten das resultierende Spektrum (magnetische Ersatzflussdichte, (3.14)) berechnet und dargestellt. Ein Vergleich mit Referenzwerten [16] [7] (vgl. Abbildung 3.34) kann durchgeführt werden und es erfolgt die Kennzeichnung von eventuell auftretenden Grenzwertüberschreitungen.
  7. Wurde eine Einzelmessung durchgeführt, so endet der Vorgang an dieser Stelle und die Ergebnisse werden grafisch dargestellt. Im Falle einer kontinuierlichen Messung werden die Schritte (1) bis (6) mehrfach wiederholt (je nach Messeinstellungen, vgl. Abschnitt 3.5.1). Zum Abschluss wird ein über alle Messungen gemitteltes Spektrum dargestellt (vgl. Seite 52). Abhängig von den Exporteinstellungen kann nach einigen Messzyklen eine kontinuierliche Abspeicherung der Rohdaten erfolgen. Nach Abschluss der Messungen wird eine Datei mit den Messergebnissen erstellt (vgl. Abschnitt 3.5.1).

Durch den beschriebenen Ablauf ergeben sich klar definierte Aufgaben für die Hard- und Software. Die über den PC ansteuerbare Hardware soll als eine Art Multiplexer ausgeführt werden, der abwechselnd die einzelnen Kanäle der Messsonde an den Spektrumanalysator schaltet.

Die Software soll den gesamten Messvorgang, von der Messdatenerfassung über die Durchführung der Berechnungen und der anschließenden Ergebnisdarstellung, steuern.

## 3.4 Hardware

Die zu entwickelnde Hardware soll an der Verbindungsstelle der beiden Messgeräte zum Einsatz kommen. Der dreikanalige Analogausgang des Feldstärkemessgeräts wird über die Hardware, die als eine Art Multiplexer fungiert, mit dem Eingang des Spektrumanalysators verbunden. Um die Spektren der einzelnen Kanäle analysieren zu können, werden die Eingänge der Hardware abwechselnd an den Ausgang durchgeschaltet. Die Entwicklung der Schaltung erfolgte nach den in Kapitel 2 angegebenen Anforderungen.

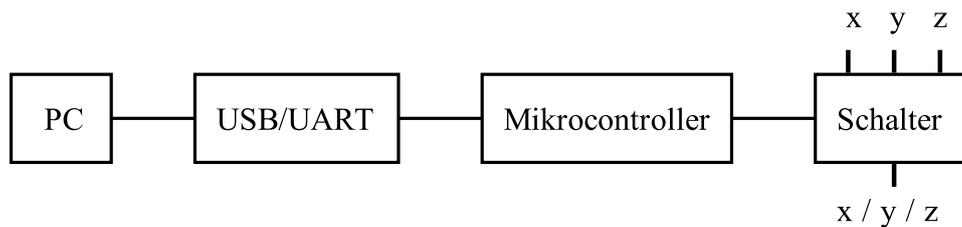


Abbildung 3.11: Prinzipieller Aufbau der Hardware

Als Herzstück der Schaltung (vgl. Abbildung 3.11) kommt ein Mikrocontroller zum Einsatz, der indirekt über seine UART-Schnittstelle mit dem PC kommunizieren kann. Der Mikrocontroller wiederum steuert einen Schalter, der die Funktion des Multiplexer übernehmen soll. Um die geforderte Ansteuerung über USB zu erreichen, wird noch zusätzlich ein USB/UART-Chip verwendet. Durch die Kombination dieses Bauteils mit einem am PC installierten VCP-Driver verhält sich die Schaltung so, als würde sie über die serielle Schnittstelle angesprochen werden. Neben dieser Funktion besitzt dieser Chip auch einen internen Taktgenerator, der für die Taktung des Mikrocontrollers verwendet wird.

Nachfolgend werden die einzelnen an der Hardware beteiligten Komponenten näher beschrieben.

### 3.4.1 Mikrocontroller

#### 3.4.1.1 Atmel ATmega8

Als Mikrocontroller wurde der *ATmega8* der Firma *Atmel*<sup>4</sup> verwendet. Dabei handelt es sich um einen 8-Bit Mikrocontroller, der auf der *AVR*<sup>®</sup> *RISC* Architektur basiert.

<sup>4</sup>Atmel Corp., San Jose, California, USA - <http://www.atmel.com>

### 3 Methoden

Er hat einen 8 kByte großen Flash-Speicher, der sich über ISP programmieren lässt. Der Controller ist in verschiedenen Bauformen erhältlich und besitzt 23 als I/O-Pins programmierbare Anschlüsse. Er verfügt auch über einen internen RC-Oszillator, der für die Taktversorgung verwendet werden kann[13].

Der interne Takt ist jedoch ungenau und weist eine Temperaturabhängigkeit auf. Daher ist auf dessen Gebrauch bei gleichzeitiger Verwendung der UART-Schnittstelle zu verzichten [1]. Im Zuge dieser Arbeit wurde die 28-polige PDIP-Bauform verwendet.

Für die Kommunikation besitzt der Mikrocontroller eine UART-Schnittstelle. Dabei können die beiden Datenleitungen RxD (Receive Data) und TxD (Transmit Data) für die Übertragung genutzt werden [13]. Für die Kommunikation des *Atmega8* mit der RS232-Schnittstelle des PC müssen die Pegel an jene des Mikrocontrollers angepasst werden und vice versa.

Einige wichtige Spezifikationen des *ATmega8* sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst. Für weitere Informationen wird an dieser Stelle auf das Datenblatt [13] verwiesen.

<b>Microcontroller</b>	ATmega8
<b>Package</b>	28-lead PDIP, 32-lead TQFP, 32-pad QFN/MLF
<b>I/O</b>	23 Programmable I/O Lines
<b>Operating Voltages</b>	2.7 - 5.5 V
<b>Speed Grades</b>	0 - 16 MHz
<b>Features</b>	In-System Programmable, Programmable Serial UART, Internal Calibrated RC Oscillator

Tabelle 3.7: Auszug aus dem Datenblatt des *ATmega8* [13]

Um den Mikrocontroller programmieren zu können, wird eine Zusatzhardware benötigt, von denen es verschiedene Ausführungen gibt. Angefangen bei reinen *In-System-Programmern* (ISP), die die Programmierung des in einer Schaltung befindlichen Controllers mit einem Verbindungskabel ermöglicht, gibt es mehr oder weniger aufwendige Entwicklungsboards, die sowohl eine Testumgebung als auch einen ISP enthalten. Üblicherweise werden diese Boards über USB oder die RS232-Schnittstelle mit dem PC verbunden.

3.4.1.2 *Atmel Evaluations-Board Version 2.0.1*

Einige Eigenschaften des verwendeten Entwicklungsboards *Atmel Evaluations-Board*<sup>5</sup> sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

<b>Name</b>	Atmel Evaluations-Board Version 2.01
<b>Betriebsspannung</b>	~ 9 V
<b>max. Stromaufnahme</b>	ca. 250 mA
<b>Kommunikation</b>	RS232-Schnittstelle (Tx, Rx) mit Pegelanpassung über MAX232
<b>Experimentierkomponenten</b>	3x Taster 2x LEDs 1x AC-Summer
<b>Features</b>	diverse IC-Sockel Quarz: 1x8 MHz, 2x16 MHz ISP-Steckerleiste für die Programmierung (u.a. für ATmega8) JTAG-Steckerleiste für die Programmierung (ATmega16 und ATmega32)

Tabelle 3.8: Auszug aus der Gebrauchsanweisung des Entwicklungsboards [10]

Nach erfolgter Montage des Bausatzes wurde das Board mit einem *ATmega8* versehen und zur Funktionskontrolle ein Testprogramm auf den Mikrocontroller übertragen. Nachdem das verwendete Board von der Entwicklungsumgebung *Atmel AVR-Studio*<sup>6</sup> nicht direkt unterstützt wird, musste das Hex-File, das den Maschinencode enthält, über ein Freeware-Programm eingespielt werden.

Über das verwendete Board kann der *ATmega8* auf zwei verschiedene Arten programmiert werden. Dieser Vorgang erfolgt jeweils über die ISP-Schnittstelle. Einerseits kann der Mikrocontroller direkt auf das Board aufgesteckt werden, aber es besteht auch die Möglichkeit den Mikrocontroller in einer externen Schaltung, über einen 10-poligen ISP-Schnittstellenadapter, zu programmieren [10]. Die zweitgenannte Möglichkeit erwies sich vor allem bei der Entwicklung des Programms als günstig, da der Mikrocontroller schon in seiner vorgesehenen Umgebung eingebettet werden konnte. Somit war es möglich die Funktionen des Programms Schritt für Schritt zu erweitern.

<sup>5</sup>Pollin Electronic GmbH, Pförring, Deutschland - <http://www.pollin.de>

<sup>6</sup>Atmel Corp., San Jose, California, USA - <http://www.atmel.com>

**PonyProg**

Für die Übertragung des Maschinencodes auf den Mikrocontroller wird in der Gebrauchsanweisung des Boards [10] auf die Freeware *PonyProg*<sup>7</sup> verwiesen, die von der Website <http://www.lancos.com> heruntergeladen werden kann. Mit dieser Software lässt sich das Programm auf den Mikrocontroller übertragen und die sogenannten *Fuse Bits* setzen. Über diese Bits können Einstellungen, die die Konfiguration des Mikrocontrollers betreffen, durchgeführt werden. Beispielsweise lässt sich dadurch die verwendete Taktquelle für den Mikrocontroller auswählen.

In Abbildung 3.12 sind die Default *Fuse* Einstellungen des *ATmega8* dargestellt. Im Auslieferungszustand ist der interne 1 MHz Takt des Mikrocontrollers aktiviert. Diese Einstellung wird über die *Fuse Bits* CKSEL3...0 ("0001") durchgeführt. Ein *Fuse Bit* wird als aktiviert angesehen, wenn es als "logisch Null" gesetzt ist. Für die Bedeutung der weiteren *Fuse Bits* wird an dieser Stelle auf das Datenblatt des *ATmega8* [13] verwiesen.



Abbildung 3.12: Default *Fuse*-Einstellungen des *ATmega8* in *PonyProg* (gesetzte Checkbox entspricht "logisch Null")

### 3.4.2 USB/UART-Schnittstelle

Um mit dem Mikrocontroller, wie gefordert, über die USB-Schnittstelle kommunizieren zu können, ist der Einsatz eines Bauteils erforderlich, das eine Art USB/UART-Schnittstelle darstellt. Es soll auf der einen Seite über USB angesprochen werden können und auf der anderen Seite passende Signale für die UART-Schnittstelle des Mikrocontrollers liefern.

<sup>7</sup>PonyProg - Claudio Lanconelli - <http://www.lancos.com>

### 3 Methoden

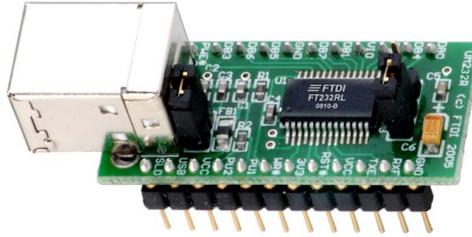


Abbildung 3.13: Das Entwicklungsmodul *UM232R* ist eine USB/UART-Schnittstelle auf Basis des *FT232R* (Abbildung aus [11]).

Eine derartige Schnittstelle stellt der IC *FT232R* der Firma *FTDI*<sup>8</sup> dar. Dieser Bauteil ist auch in einer schon beschalteten Variante inklusive USB-Buchse (Typ B), dem *UM232R* (vgl. Abbildung 3.13), erhältlich. Für den Betrieb des Chips ist es nicht erforderlich einen eigenen USB-Driver zu entwickeln, da das gesamte Protokoll vom Bauteil selbst verwaltet wird. Durch die Installation des lizenzfreien VCP-Drivers des Chipherstellers kann das mit dem *FT232R* verbunden Zielsystem virtuell über die serielle Schnittstelle angesprochen werden [11].

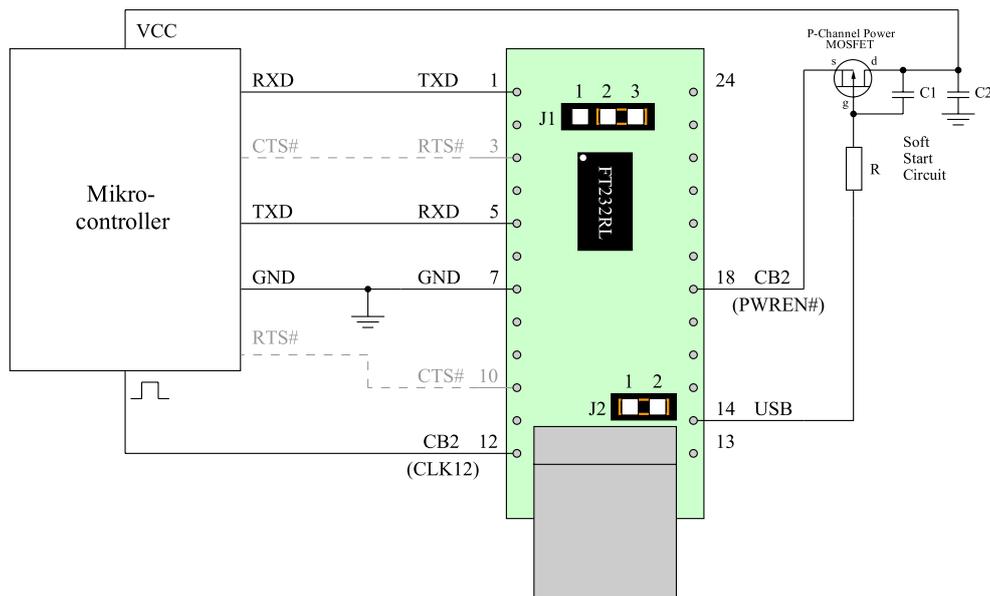


Abbildung 3.14: USB-Mikrocontroller Schnittstelle realisiert mit dem *UM232R* (USB Bus Powered) nach [11]

<sup>8</sup>Future Technology Devices International Ltd., Glasgow, United Kingdom - <http://www.ftdichip.com>

Um die UART-Schnittstelle eines Mikrocontrollers über den *FT232R* ansprechen zu können, wurde die in Abbildung 3.14 dargestellte Konfiguration gewählt. Dabei handelt es sich um eine leicht modifizierte Variante der im Datenblatt [11] angegebenen Beschaltung. Diese ermöglicht eine Spannungsversorgung des Mikrocontrollers über USB.

Um die 500  $\mu\text{A}$  Anforderung des Stromes im *USB Suspend Mode* zu erfüllen, wird der *CBUS3*-Pin (Pin 18) mit dem *PWREN#*-Signal (Power Enable) programmiert und damit ein P-Kanal MOSFET angesteuert .

Im *USB Suspend Mode* liefert *PWREN#* einen High-Pegel wodurch sich am Gate derselbe Pegel wie am Source-Anschluss einstellt, der P-Kanal MOSFET sperrt und der Mikrocontroller wird nicht mit Spannung versorgt.

Nach der Freigabe durch den Bus liefert *PWREN#* einen Low-Pegel der den MOSFET in einen leitfähigen Zustand versetzt und somit die Spannungsversorgung des Mikrocontrollers gewährleistet. Durch den *Soft Start Circuit* wird der Stromanstieg beim Einschalten des MOSFET begrenzt.

Zur Erhöhung der Übertragungssicherheit könnte über die Leitungen RTS (Request to Send) und CTS (Clear to Send) eine Datenflusskontrolle über Hardware-Handshaking durchgeführt werden.

Durch entsprechende Programmierung des EEPROMs ist es möglich, ein im Chip generiertes Taktsignal (*CLK6*, *CLK12*, *CLK24*, *CLK48*) an einen der konfigurierbaren *CBUS*-Pins herauszuführen und damit den Mikrocontroller zu takten. Somit kann auf einen zusätzlichen Quarz verzichtet werden.

Üblicherweise werden USB2.0-Geräte nach ihrer Stromaufnahme klassifiziert. *Low-Power* Geräte dürfen im Betrieb eine maximale Stromaufnahme von 100 mA aufweisen. *High-Power* Geräte dürfen diese 100 mA überschreiten und können vom Bus bis zu 500 mA beziehen [5].

#### ***MProg***

Die Programmierung des *FT232R* erfolgt über das Programm *MProg*<sup>9</sup> mit dem die EEPROM Programmierung bei *FTDI* Bauteilen durchgeführt werden kann. Einstellungen, die konfigurierbaren *CBUS I/O Pins* betreffend, sowie die Festlegung der maximalen Stromaufnahme, kann über diese Software erfolgen. Die grafische Benutzeroberfläche

---

<sup>9</sup>Future Technology Devices International Ltd., Glasgow, United Kingdom - <http://www.ftdichip.com>

### 3 Methoden

des Programms ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Für die Handhabung der Software und weitere Details wird an dieser Stelle an die Bedienungsanleitung von *MProg* [2] verwiesen.

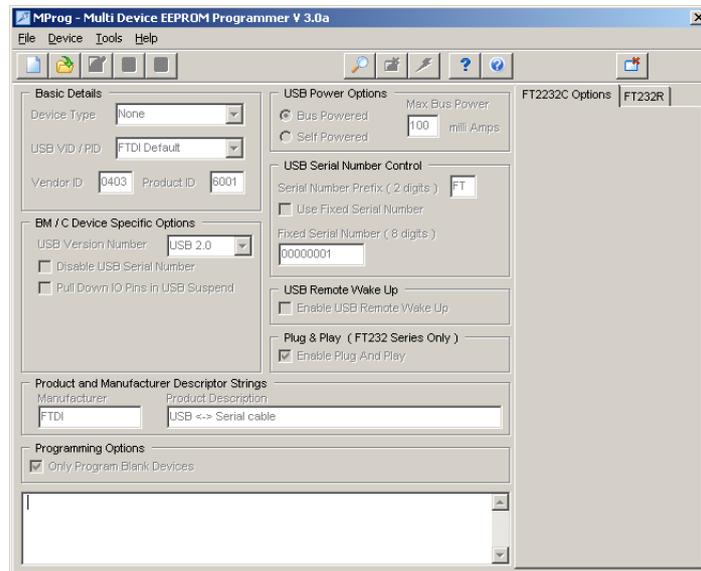


Abbildung 3.15: *MProg*-Software zur Programmierung des *FT232R*

#### 3.4.3 Schalter

Der Schalter ist für die Umschaltung zwischen den einzelnen Kanälen des Feldstärke-messgeräts *CA 42* verantwortlich und soll, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, über den Mikrocontroller angesteuert werden.

Die Wahl fiel auf den elektromechanischen Schalter *SEM133T* (vgl. Abbildung 3.16) der Firma *Narda*<sup>10</sup> mit dem sich laut Datenblatt [4] Signale im Frequenzbereich von DC bis 18GHz übertragen lassen.

Der *SEM133T* besitzt vier SMA-Anschlüsse von denen drei als Eingänge und einer als Ausgang genutzt werden soll. Streng genommen wird dadurch der Schalter in umgekehrter Richtung betrieben. Dies äußert sich jedoch nur durch die mit 50  $\Omega$  abgeschlossenen Eingänge, wenn keine Durchschaltung erfolgt (vgl. Abbildung 3.17).

<sup>10</sup> L-3 Communications Narda Microwave - East Corp., Hauppauge, New York, USA - <http://www.nardamicrowave.com>



Abbildung 3.16: Elektromechanischer Schalter *Narda SEM133T* (Abbildung aus [4])

Die Eingänge des Schalters sollen in weiterer Folge an den Analogausgang der Magnetfeldsonde angeschlossen werden. Über den Schalter wird dann ein Kanal ausgewählt und an den Ausgang durchgeschaltet.

Die Versorgung und Ansteuerung des Schalters erfolgt über die Anschlüsse an der Oberseite. Die für den Betrieb erforderliche Gleichspannung von 28 V wird an den *COM+*-Anschluss des Bauteils angelegt. Wird der Kontakt des zu schaltenden Kanals auf Massepotential gelegt, so wird der Schalter geschlossen und es entsteht ein Stromfluss von ca. 140 mA. Das am entsprechenden Eingang anliegende Signal wird dadurch an den Ausgang durchgeschaltet. Der Aufbau und die Innenschaltung des Bauteils sind in Abbildung 3.17 dargestellt.

**SEM133T**

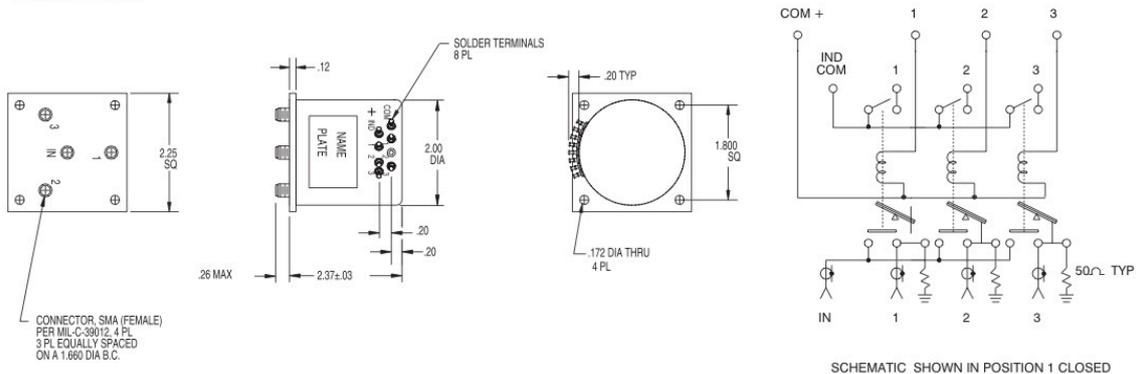


Abbildung 3.17: Aufbau und Innenschaltung des *Narda SEM133T* (Abbildung aus [4])

Der Schalter besitzt auch einen sogenannten Indikatorschaltkreis. Dieser wird gleichzeitig mit dem SMA-Signalfad geschaltet und ermöglicht eine unabhängige Anzeige,

welche Schalterstellung gerade aktiviert ist. Weitere Eigenschaften des Schalters sind in Tabelle 3.9 angeführt.

**Narda SEM133T - Common Specifications**

RF Impedance	50 ohms nominal
Actuating Voltage	28 Vdc
Switching Time	15 ms (max.)
Switching Sequence	Break Before Make
Operating Ambient Temp.	-35°C to +70°C
Operating Life	1 million cycles/position

Tabelle 3.9: Auszug aus den Spezifikationen des *Narda*-Schalters *SEM133T* [4]

### 3.4.4 Schaltung und Aufbau

#### 3.4.4.1 Schaltung

Nach der Bestimmung der einzelnen Hardwarekomponenten, konnte mit dem eigentlichen Schaltungsentwurf begonnen werden. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 3.18 ein erweitertes Blockschaltbild dargestellt. Der detaillierte Schaltplan befindet sich im Anhang (vgl. Seite 125).

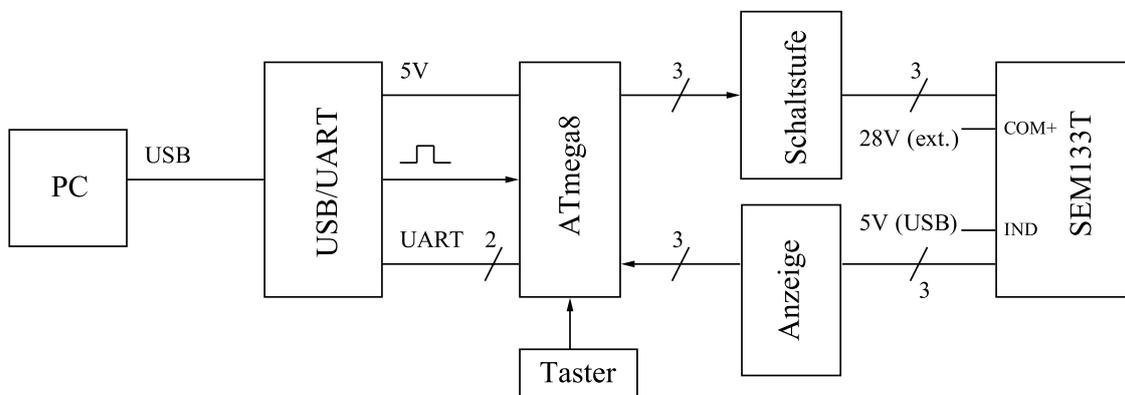


Abbildung 3.18: Erweitertes Blockschaltbild der Hardware

#### USB/UART

Für die Ansteuerung des Mikrocontrollers über den USB/UART-Chip wird die Schaltung aus Abbildung 3.14 ohne Datenflusskontrolle herangezogen.

### 3 Methoden

Neben den für diese Beschaltung notwendigen Einstellungen wurde der *FT232R* so programmiert, dass am *CBUS2*-Pin (Pin 12) das *CLK12*-Signal (*12MHz Clock Output*) anliegt. Um auf den Einsatz eines zusätzlichen Quarzes verzichten zu können, wurde dieses Clock-Signal verwendet um den Mikrocontroller zu takten.

Der Mikrocontroller, sowie die gesamte Logik soll über die vom USB bereitgestellte Spannung versorgt werden. Der Leistungsbedarf des Schalters kann aber nicht über den USB gedeckt werden und muss über eine externe Quelle erfolgen. Somit kann der maximal bereitzustellende Strom im EEPROM des *FT232R* auf 100 mA, was dem Bedarf eines *Low-Power* Geräts entspricht [5], festgelegt werden. Dieser Wert liegt einiges über dem tatsächlichen Strombedarf des Logikteils der Schaltung von circa 50 mA.

Die Programmierung des EEPROM erfolgte, wie schon im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, mit der Software *MProg*. Für den Betrieb in der beschriebenen Konfiguration sind die in Abbildung 3.19 dargestellten Einstellungen vorzunehmen.

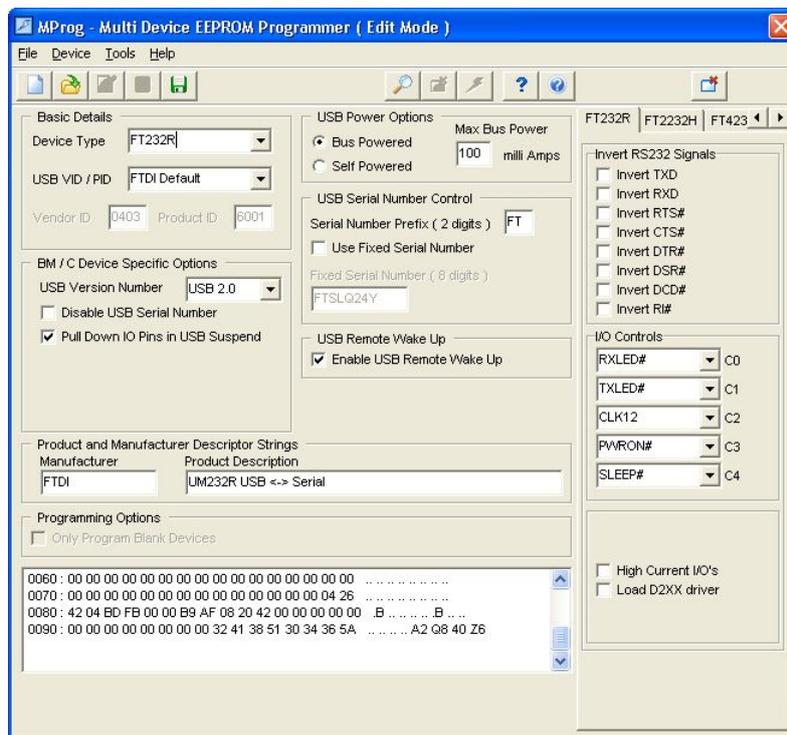


Abbildung 3.19: Konfiguration des *FT232R* in *MProg*

## Mikrocontroller

Um den *ATmega8* mit dem herausgeführten 12MHz-Takt des *FT232R* betreiben zu können, mussten die *Fuse Bits* des Mikrocontrollers entsprechend programmiert werden. Die *Fuses* *CKSEL3...0* wurden auf "0000" gesetzt und der *CBUS2*-Pin (*CLK12*) des *FT232R* wurde mit dem *XTAL1*-Pin (Pin 9) des *ATmega8* verbunden [13]. Die vorzunehmenden Einstellungen in *PonyProg* sind in Abbildung 3.20 dargestellt.



Abbildung 3.20: *Fuse*-Einstellungen des *ATmega8* bei externem 12MHz-Takt in *PonyProg* (gesetzte Checkbox entspricht logisch Null)

Drei Pins des Mikrocontrollers werden verwendet, um über die Ausgangsstufen, die aus einem Vorwiderstand und einem Transistor bestehen, den elektromechanischen Schalter *SEM133T* anzusteuern (vgl. Abbildung 3.21(a)). Eine Freilaufdiode verhindert beim Abschalten das Auftreten von Spannungsspitzen die die Schaltung beschädigen können.

Der im Schalter integrierte Indicatorschaltkreis wird benutzt, um über die Eingangsstufe eine Rückmeldung zu liefern, welche Schalterstellung gerade ausgewählt ist. Es erfolgt eine Rückmeldung an drei Pins des Mikrocontrollers sowie eine Anzeige mit Leuchtdioden (vgl. Abbildung 3.21(b)).

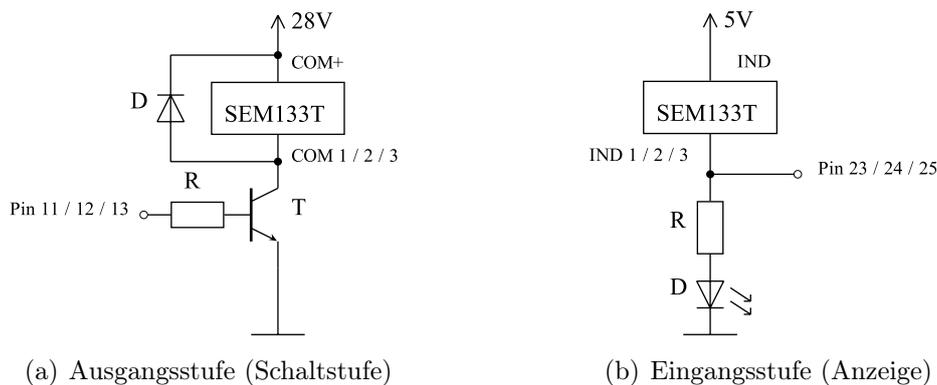


Abbildung 3.21: Ausgangs- und Eingangsstufe des Mikrocontrollers

Um eine Kommunikation mit dem PC zu ermöglichen, wurden die Datenleitungen der UART-Schnittstelle des *ATmega8* (RxD und TxD) mit jenen des *FT232R* verbunden. RxD des *ATmega8* wird dabei an TxD des *FT232R* angeschlossen und vice versa. Diese Verbindung soll später dazu verwendet werden um den Schalter über den PC steuern zu können.

An einen Anschluss des Mikrocontrollers wird auch ein Taster angeschlossen. Dieser Pin wird später so programmiert, dass auch eine manuelle Betätigung des Schalters, und somit eine Weiterschaltung der Kanäle, möglich ist.

#### Schalter

Bei einer Spannung von 28 V benötigt der Schalter einen Strom von zirka 140 mA [4]. Das entspricht einem Leistungsbedarf von zirka 3,92 W. Die maximale über USB2.0 zur Verfügung stehende Leistung von 2,5 W (5 V, 500 mA) würde somit überschritten werden. Beim Versuch den Schalter mit einer geringeren Leistung unter Einsatz eines DC-DC-Wandlers zu betreiben, konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Für die Spannungsversorgung des Schalters wurde deswegen ein externes 28V Steckernetzteil [8] herangezogen.

#### 3.4.4.2 Layout und Aufbau

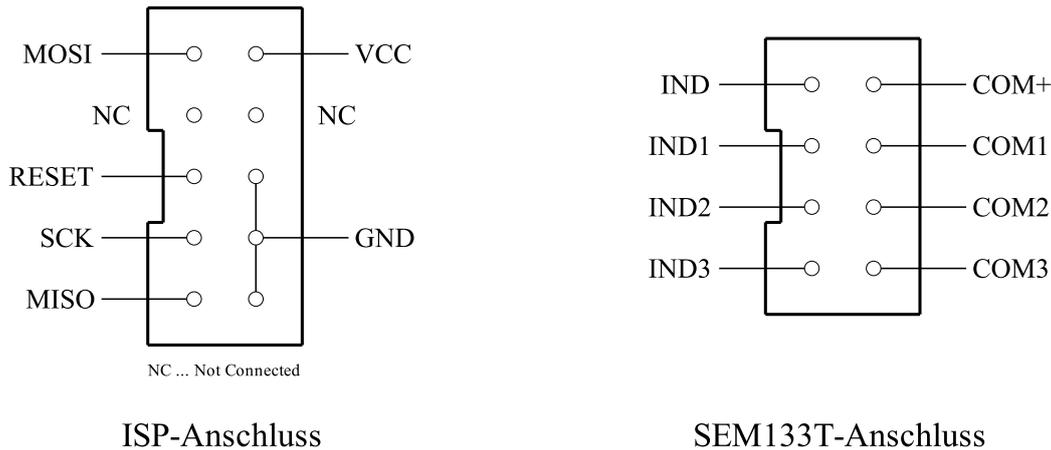
In der Entwicklungsphase erfolgte der Aufbau der Schaltung auf einem Protoboard. Dadurch konnten verschiedene Schaltungsvarianten getestet werden bevor die entgeltliche Konfiguration gewählt wurde.

Für die Erstellung des Layouts wurde die CAD Software *Eagle*<sup>11</sup> herangezogen. Zunächst wurden die benötigten Bauteile und Steckverbinder in den Schaltplan im *Schematic-Editor* eingefügt. *Eagle* besitzt Bauteil-Bibliotheken in denen Rastermaße und weitere geometrische Eigenschaften einer Vielzahl von Bauelementen hinterlegt sind.

Beim Hinzufügen der elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Bauelementen musste auf die richtige Pinbelegung geachtet werden. Zu diesem Zeitpunkt war es schon erforderlich die Belegung der Steckverbinder für die ISP-Schnittstelle und für den Anschluss des Schalters *SEM133T* festzulegen (vgl. Abbildung 3.22).

---

<sup>11</sup>CadSoft Computer GmbH, Pembroke Pines, Florida, USA - <http://www.cadsoftusa.com>

Abbildung 3.22: Steckverbindungen für ISP und Schalter *SEM133T*

Die angegebenen Bezeichnungen der ISP-Schnittstelle beziehen sich auf die entsprechenden Pins des Mikrocontrollers *ATmega8*. Die *IND*-Anschlüsse des *SEM133T*-Steckers bezeichnen die Kontakte des Indikatorschaltkreises und die *COM*-Anschlüsse beziehen sich auf die Kontakte des Steuerungsschaltkreises. Die Anschlüsse für die Leuchtdioden und für den Taster wurden mit Lötstiften ausgeführt.

Nach Fertigstellung des Schaltplans im *Schematic-Editor* konnte mit der Erstellung des Layouts begonnen werden. Dabei musste schon auf die spätere Unterbringung im Gehäuse geachtet werden, da der in das Gehäuse eingebaute Schalter die Platine teilweise überlappt. Es wurde darauf geachtet, dass dieser Teil der Platine frei von Bauteilen bleibt.

Im *Layout-Editor* wurden die Bauteile wie gewünscht in Position gebracht. Die elektrischen Verbindungen wurden zwar automatisch aus dem Schaltplan übernommen, waren aber noch nicht als Leiterbahnen im Layout ausgeführt. Mit Hilfe des *Autorouters*, aber auch manuell, wurde versucht die Leiterbahnen so zu platzieren, dass möglichst alle Leitungen auf einer Seite der Platine untergebracht werden konnten. Mehrere Versuche mit unterschiedlichen Bauteilanordnungen waren nötig bis ein gutes Ergebnis (vgl. Anhang Seite 126) erzielt werden konnte. Um eine einseitige Leiterplatte verwenden zu können, wurde beschlossen die drei auf der Oberseite des Layouts verbleibenden Leiterbahnen als Drahtbrücken auszuführen. Zum Abschluss des Layout-Designs wurde noch versucht die Anschlusspads möglichst groß, sowie die Leiterbahnen möglichst breit auszuführen.

Die Fertigung der Leiterplatte erfolgte am *Institut für Health Care Engineering* der *TU Graz* nach der Methode des Isolationsfräsens. Dabei werden auf einer kupferbeschich-



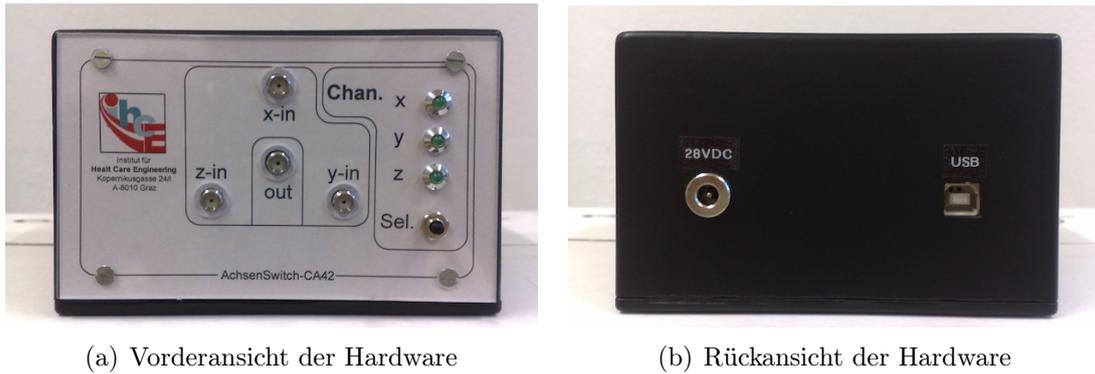


Abbildung 3.24: Vorder- und Rückansicht der Hardware



Abbildung 3.25: Abbildung der Hardware

## 3.4.5 Programmierung des Mikrocontrollers

### 3.4.5.1 Allgemein

Bevor mit der Erstellung des eigentlichen Programms begonnen werden konnte, musste die allgemeine Konfiguration des Mikrocontrollers *ATmega8* durchgeführt werden. Diese Einstellungen erfolgten über Register und betrafen die Ein- und Ausgänge, die UART-Schnittstelle, sowie einige spezielle Funktionen des Mikrocontrollers. Falls nicht anders angegeben, wurden die Informationen aus dem Datenblatt [13] des Mikrocontrollers entnommen.

### Ein- und Ausgänge

Ob ein Anschluss des Mikrocontrollers ein Ein- oder Ausgang ist, hängt von seiner

Definition im *DDR (Data Direction Register)* des jeweiligen Ports ab. Wird ein Pin im *DDR* mit "0" programmiert, so erhält man einen Eingang und bei Programmierung mit "1" einen Ausgang.

**Eingänge**

Pin	Anschluss	Funktion
PC0 (Pin 23)	<i>IND1</i>	Indikatorschaltkreis, Kanal X
PC1 (Pin 24)	<i>IND2</i>	Indikatorschaltkreis, Kanal Y
PC2 (Pin 25)	<i>IND3</i>	Indikatorschaltkreis, Kanal Z
PD2 (Pin 4)	<i>BUT1</i>	Taster, Achsumschaltung

**Ausgänge**

Pin	Anschluss	Funktion
PC5 (Pin 11)	<i>COM1</i>	Steuerungsschaltkreis, Kanal X
PD6 (Pin 12)	<i>COM2</i>	Steuerungsschaltkreis, Kanal Y
PD7 (Pin 13)	<i>COM3</i>	Steuerungsschaltkreis, Kanal Z

Tabelle 3.10: Belegung der Ein- und Ausgänge des *ATmega8* nach dem Schaltplan (Anhang Seite 125)

Die als Ein- und Ausgänge beschalteten Pins des Mikrocontrollers ergeben sich aus dem Schaltplan (vgl. Anhang Seite 125) und wurden in Tabelle 3.10 zusammengefasst. Diese Konfiguration konnte durch Programmierung von *DDRC (DDR des Ports C)* mit "00000000" und *DDRD (DDR des Ports D)* mit "11100000" erreicht werden.

**UART-Schnittstelle**

Die USART-Schnittstelle des Mikrocontrollers soll im asynchronen Modus UART, mit den in Tabelle 3.11 angegebenen Parametern, betrieben werden. Um das zu erreichen, müssen einige Register entsprechend konfiguriert werden.

Die Baudrate der UART-Schnittstelle kann über das Register *UBRR (USART Baud Rate Register)* festgelegt werden. Der Inhalt dieses Registers lässt sich anhand der einzustellenden Baudrate *BR* und der Taktfrequenz des Mikrocontrollers  $f_{osc}$  bestimmen. Im *Asynchronous Normal Mode (U2X=0)* erfolgt die Berechnung dieses Registerinhalts nach (3.11) [13].

$$UBRR = \frac{f_{osc}}{16 \cdot BR} - 1 = \frac{12 \text{ MHz}}{16 \cdot 9600 \frac{\text{bit}}{\text{s}}} - 1 = 77,125 \approx 77 \quad (3.11)$$

### 3 Methoden

<b>Baudrate</b>	9600 Baud
<b>Datenbits</b>	8 bit
<b>Parität</b>	keine
<b>Stopbits</b>	1 bit

Tabelle 3.11: Einstellungen der UART-Schnittstelle des *ATmega8*

Bei einer Taktfrequenz von 12 MHz (*CLK12* des *FT232R*) ergibt sich für *UBRR* ein gerundeter Wert von 77. Um nun den sich durch die Rundung ergebende relativen Fehler der Baudrate  $Error_{[\%]}$  zu berechnen, muss zunächst die tatsächliche Baudrate  $BR_{\text{Closest}}$  ermittelt werden. Dafür wird (3.11) zu (3.12) umgeformt.

$$BR_{\text{Closest}} = \frac{f_{\text{osc}}}{16 \cdot (UBRR + 1)} = \frac{12 \text{ MHz}}{16 \cdot (77 + 1)} = 9615,385 \frac{\text{bit}}{\text{s}} \quad (3.12)$$

Anhand der tatsächliche Baudrate  $BR_{\text{Closest}}$  kann nun die Berechnung des sich ergebenden relativen Fehlers nach (3.13) [13] erfolgen.

$$Error_{[\%]} = \left( \frac{BR_{\text{Closest}}}{BR} - 1 \right) \cdot 100 \% = \left( \frac{9615,385 \frac{\text{bit}}{\text{s}}}{9600 \frac{\text{bit}}{\text{s}}} - 1 \right) \cdot 100 \% = 0,16 \% < 0,5 \% \quad (3.13)$$

Der sich ergebende Fehler ist geringer als 0,5 % und die Wahl des gerundeten Werts von *UBRR* ist somit zulässig. Im Allgemeinen wäre auch ein höherer Fehler erlaubt, jedoch geht das auf Kosten der Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen [13]. Im Mikrocontroller wird das *UBRR* in ein *High- (UBBRH)* und ein *LowByte (UBBL)* aufgeteilt.

Die Einstellung des *Frame-Format* geschieht über das Register *UCSRC (USART Control and Status Register C)* (vgl. Abbildung 3.26). Um das Register überhaupt beschreiben zu können, muss das Bit *URSEL* gesetzt werden. Der asynchrone Modus der USART-Schnittstelle (UART) wird über das Bit *UMSEL* ("0") eingestellt und die Wahl der Parität erfolgt über die Bits *UPM1...0* ("00" für keine Parität).

Das Bit *USBS* legt die Anzahl der *Stopbits* fest ("0" entspricht 1 Stop Bit) und die Bits *UCSZ1...0* bestimmen die Anzahl der Datenbits ("11" entspricht 8 Data Bits). Für genauere Informationen wird an dieser Stelle an das Datenblatt [13] verwiesen.

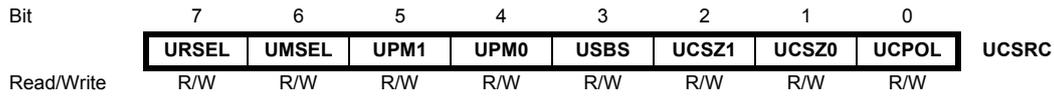


Abbildung 3.26: Register *UCSRC* der USART-Schnittstelle des *ATmega8* (Abb. aus [13])

### Kommunikation

Um überhaupt eine Kommunikation über die UART-Schnittstelle zu erlauben, muss das Register *UCSRB* (*USART Control and Status Register B*) (vgl. Abbildung 3.27) entsprechend konfiguriert werden. Über das Bit *TXEN* (*Transmitter Enable*) kann das Senden von Zeichen aktiviert werden, das Bit *RXEN* (*Receiver Enable*) regelt den Zeichenempfang. Um bei Empfang ein Interrupt zu erhalten, wird auch das Bit *RXCIE* (*RX Complete Interrupt Enable*) gesetzt.

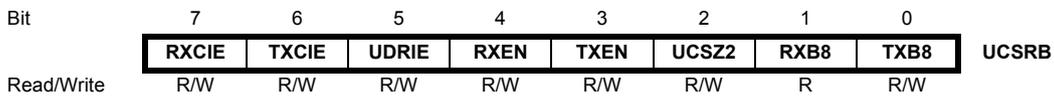


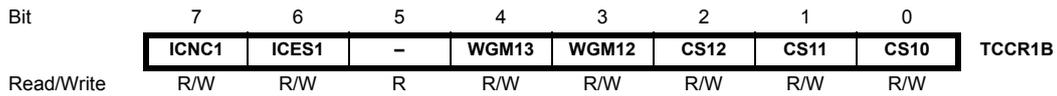
Abbildung 3.27: Register *UCSRB* der USART-Schnittstelle des *ATmega8* (Abb. aus [13])

Zum Senden eines Zeichens muss es in das Register *UDR* (*USART Data Register*) geschrieben werden. Beim Empfang kann man das Zeichen in der sogenannte Interruptservice routine (ISR) aus dem Register *UDR* auslesen.

Durch das beim Zeichenempfang auftretende Interrupt wird der momentane Programmablauf unterbrochen und das Programm springt in die ISR. In diesem Programmteil wird der Zeichenempfang abgewickelt. Nach Beendigung springt das Programm an jene Stelle zurück an der es unterbrochen wurde und führt dort die Ausführung fort.

### Timer

Eine möglichst genaue Zeitmessung kann im *CTC*-Modus (*Clear Timer on Compare match*) erfolgen der nur bei *Timer1* möglich ist. Der Inhalt des Timers wird dabei mit dem Inhalt des Registers *OCR1A* (*Output Compare Register 1A*), das mit einem bestimmten Wert vorbelegt werden kann, verglichen. Beim Auftreten einer Übereinstimmung der beiden Register wird der Timer auf "0" zurückgesetzt und beim nächsten Taktzyklus wird ein Interrupt des *OCIE1A* ausgelöst [1].

Abbildung 3.28: Register *TCCR1B* des *ATmega8* (Abb. aus [13])

Für die Aktivierung des *CTC*-Modus wird das *WGM12*-Bit im Register *TCCR1B* (*Timer/Counter1 Control Register B*) (vgl. Abbildung 3.28) auf "1" gesetzt. Um eine Erhöhung des Timers bei jedem Taktzyklus zu erreichen, ist die Einstellung der höchstmöglichen Genauigkeit erforderlich (Vorteiler = 1). Dies geschieht über das Setzen der Bits *CS12...10* auf "001".

Wird nun das Register *OCR1A* (High-Byte: *OCR1AH*, Low-Byte: *OCR1AL*) mit dem Wert 11999 vorbeladen, so erfolgt nach 12000 Taktzyklen ein Interrupt des Timers. Diese Anzahl von Taktzyklen entspricht genau 1/1000 der Taktfrequenz von 12 MHz und bedeutet, dass von einem Interrupt zum nächsten genau 1 ms vergeht.

Unter Verwendung von Hilfsregistern, die in der ISR hinaufgezählt werden, kann man größere Zeitintervalle erreichen. Für die Aktivierung muss nur noch die Interruptfreigabe, über das Setzen von *OCIE1A* (*Timer/Counter1, Output Compare A Match Interrupt Enable*) im Register *TIMSK* (*Timer/Counter Interrupt Mask Register*) erfolgen.

### Generelle Interruptfreigabe und Stack

Um überhaupt mit Interrupts arbeiten zu können, muss die generelle Interruptfreigabe über den Befehl *SEI* erfolgen.

Tritt ein Interrupt auf, so wird der momentane Programmablauf unterbrochen und das Programm springt in die entsprechende ISR. Nach deren Abarbeitung springt das Programm wieder an die Stelle zurück, an der es unterbrochen wurde, und fährt dort mit der Ausführung fort.

Um sicherzustellen, dass das Programm so weiterläuft als wäre nichts geschehen, empfiehlt es sich das Status Register (*SREG*) und diverse Hilfsregister zu sichern. Im *SREG* werden bei gewissen Operationen Zustände von Berechnungen gespeichert [1].

Die Register sollen beim Eintritt in die ISR gesichert und beim Verlassen wiederhergestellt werden. Dieser Vorgang wird vom Stack übernommen. Dabei handelt es sich um einen Stapelspeicher, der nach dem *LIFO*-Prinzip (*Last In First Out*) arbeitet. Der

Stack wird über die beiden Register *SPL* (Low-Byte) und *SPH* (High-Byte) zur Initialisierung auf das Ende des RAMs (*RAMEND*) gesetzt. Mit dem Befehl *PUSH* können Daten auf den Stack hinzugefügt werden, über den Befehl *POP* werden die oben am Stapel aufliegenden Daten entnommen [1].

#### 3.4.5.2 Programmierung

Als Entwicklungsumgebung wurde das *AVR-Studio* herangezogen, das auf der Website von *Atmel* zum kostenlosen Download angeboten wird. Die Programmierung erfolgt in *Assembler* (8-bit *AVR*<sup>®</sup> *Instruction Set* [12]) und das fertige Programm wurde im *AVR-Studio* kompiliert. Wie schon erwähnt, wird das verwendete Board (vgl. Abschnitt 3.4.1.2) von der Entwicklungsumgebung nicht direkt unterstützt und somit musste das Programm mit Hilfe der Freeware *PonyProg* auf den Mikrocontroller übertragen werden mit der auch die Programmierung der *Fuse Bits* erfolgte (vgl. Abschnitt 3.4.1.2).

Die Programmierung der *Fuse Bits*, um die externe 12 MHz Taktversorgung zu verwenden, wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt (vgl. Abbildung 3.20) beschrieben. Das Flussdiagramm in Abbildung 3.29 zeigt den prinzipiellen Ablauf des Assemblerprogrammes.

Im Programmcode erfolgen zunächst einige Definitionen und die Berechnung der Baudrateneinstellung. Der eigentliche Programmstart erfolgt bei der Adresse "0x000". Um nicht die gesamten Interruptvektoren, die im darauffolgenden Adressbereich definiert sind, zu durchlaufen, erfolgt an dieser Stelle ein Sprung zum Hauptprogrammteil.

#### Initialisierung

Das Programm beginnt mit der Initialisierung der zuvor beschriebenen Funktionen:

- Festlegung der Ein- und Ausgänge
- Initialisierung des Stacks
- Einstellung und Freigabe der UART-Schnittstelle
- Einstellung (und Freigabe) des *Timer1* im *CTC*-Modus
- Globale Interruptfreigabe

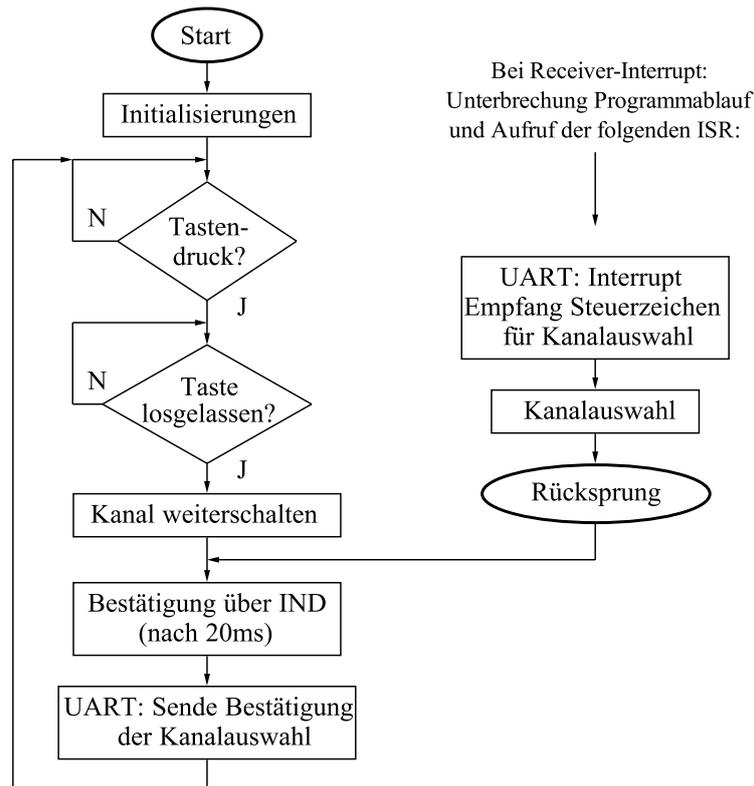


Abbildung 3.29: Flussdiagramm des Programms des Mikrocontrollers

Danach wartet das Programm in einer Endlosschleife auf einen Tastendruck (High Pegel von  $PD2$ ). Durch das Auftreten eines Receiver-Interrupts kann dieser Wartevorgang für die Ausführung der ISR unterbrochen werden. Der Interrupt des Timers wurde zur Laufzeit noch nicht aktiviert.

### Betätigung des Tasters

Erfolgt ein Tastendruck so wird ein Unterprogramm aufgerufen. Vor dessen Ausführung wartet das Programm aber in einer Schleife bis der Taster losgelassen wird.

Nach dem Loslassen erfolgt die Erhöhung einer Hilfsvariablen, mit deren Hilfe der zu aktivierende Kanal ausgewählt wird. Die Umschaltung erfolgt jeweils von einem Kanal zum nächsten (Kanal X, Kanal Y, Kanal Z). Nach einem kompletten Durchlauf aller Schaltzustände wird mit der Kanalauswahl neu begonnen. Beim Umschalten des Kanals erfolgt auch eine Aktivierung des Timers und das Programm begibt sich in einen Wartezustand bis das Timer-Interrupt auftritt.

Bei den gewählten Einstellungen tritt das Timer-Interrupt jede  $\frac{1}{1000}$  s auf. Bei jedem ISR-Aufruf erfolgt die Erhöhung einer Hilfsvariablen. Das bedeutet, dass nach 20 Interrupts 20ms vergangen sind. Nach dieser Zeit wird das Programm aus dem Wartezustand geholt und die Programmausführung fährt fort.

Diese 20ms wurden gewählt um sicherzugehen, dass der Schaltvorgang abgeschlossen ist bevor über die Ports *PC0*, *PC1* und *PC2* das Feedback des Indikatorschaltkreises abgefragt wird (Die maximale Schaltzeit des *SEM133T* beträgt 15ms [4]). Der Timer wird gestoppt und nach der Identifizierung des gewählten Kanals wird ein Symbol (*X*, *Y*, *Z* oder *0*) über die UART-Schnittstelle verschickt. Danach kehrt der Programmablauf wieder in die Endlosschleife zurück und wartet erneut auf einen Tastendruck.

### Empfang über UART

Kommt es nun zu einem Zeichenempfang über die UART-Schnittstelle so wird die ISR des Receiver-Interrupts aufgerufen. Zunächst erfolgt die Identifikation des empfangenen Symbols. Wird es erkannt, so antwortet der Mikrocontroller mit einem Steuerzeichen (*Acknowledge*). Nach der Auswahl des entsprechenden Kanals nimmt das Programm den schon bekannten Verlauf und nach erfolgter Kanalauswahl sendet der Mikrocontroller ein Zeichen zur Bestätigung (vgl. Tabelle 3.12).

Befehl		Antwort	
'x'	Auswahl Kanal X	06 <sup>1</sup> 'X' 03 <sup>2</sup>	Kanal X ausgewählt
'y'	Auswahl Kanal Y	06 'Y' 03	Kanal Y ausgewählt
'z'	Auswahl Kanal Z	06 'Z' 03	Kanal Z ausgewählt
'0'	Abschalten	06 '0' 03	Kein Kanal ausgewählt
'?'	Aktueller Kanal	<sup>3</sup>	Kanal X, Y, Z oder 0

<sup>1</sup> Steuerzeichen ASCII 06: ETX (End of TeXt)

<sup>2</sup> Steuerzeichen ASCII 03: ACKN (ACKNowledge)

<sup>3</sup> Eine der obengenannten Antworten

Tabelle 3.12: Steuerbefehle für die Kommunikation mit der Hardware über VCP

Die Steuerung der Hardware erfolgt über die in Tabelle 3.12 angeführten Befehle. Diese können über die (virtuelle) serielle Schnittstelle an den Mikrocontroller gesendet werden. Die Antwort des Mikrocontrollers gibt Aufschluss über den aktuell ausgewählten Kanal.

## 3.5 Software

### 3.5.1 Allgemein

Für die Implementierung des Messsystems ist zusätzlich zur erforderlichen Hardware auch die Entwicklung einer Software nötig. Neben dem Messvorgang sollen verschiedene Zusatzfunktionen implementiert werden. Der prinzipielle Ablauf des Programms ist in Abbildung 3.30, in Form eines Ablaufdiagramms, dargestellt.

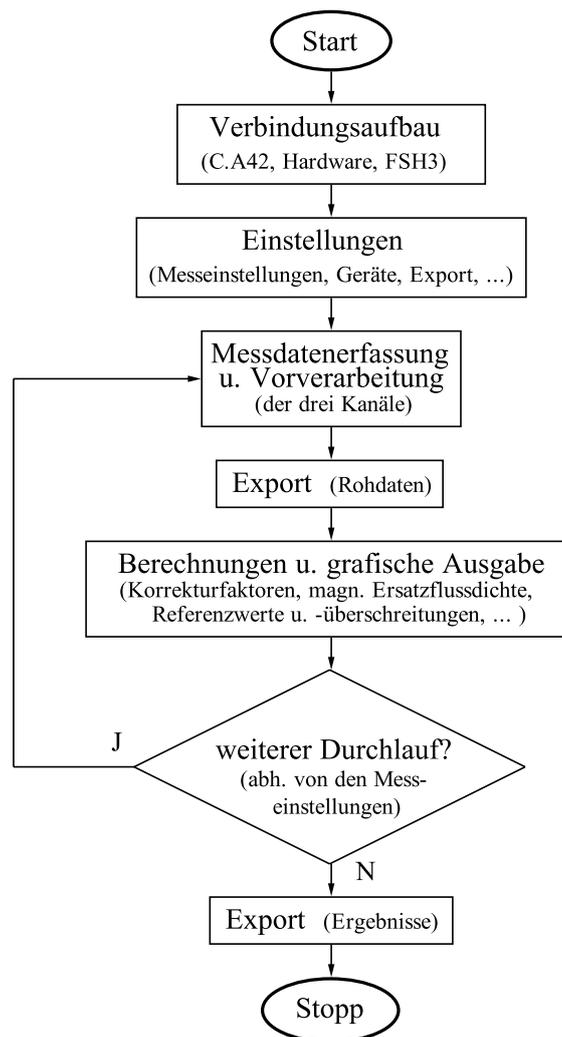


Abbildung 3.30: Flussdiagramm des Programmablaufes

Grundsätzlich soll das Programm nach dem folgenden Schema (vgl. Abbildung 3.30) ablaufen:

- Um eine Messung (vgl. Abbildung 3.10) durchführen zu können, ist eine Kommunikation mit den beteiligten Geräten (Hardware, Feldstärkemessgerät *C.A 42*, Spektrumanalysator *FSH 3*) erforderlich.
- Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau können die notwendigen Einstellungen getroffen werden (Export, Mess- und. Geräteeinstellungen).
- Bei der darauffolgenden Messdatenerfassung wird der Kanal gewählt, das Spektrum gemessen und die erforderlichen Daten vom Feldstärkemessgerät ausgelesen. Dieser Vorgang, inklusive einer Vorverarbeitung der Messwerte, erfolgt für alle drei Kanäle. Die Vorverarbeitung beinhaltet eine Umrechnung in die magnetische Flussdichte und die Miteinbeziehung der Kalibrierungsfaktoren.
- Um einen Datenverlust im Falle eines Fehlers zu vermeiden, kann nach einigen Messzyklen (je nach Export-Einstellungen) eine Zwischenspeicherung der Rohdaten erfolgen.
- Anhand der gemessenen und bereits vorverarbeiteten Spektren erfolgt nun die Berechnung des resultierenden Spektrums (magnetische Ersatzflussdichte, (3.14)). Das Ergebnis wird am Bildschirm dargestellt und kann mit den Referenzwerten verglichen werden.
- Abhängig von den gewählten Messeinstellungen wird der Messvorgang und die darauffolgenden Berechnungen mehrfach wiederholt und die Messergebnisse gemittelt.
- Nach dem letzten Durchlauf werden die berechneten Ergebnisse gespeichert und der Messvorgang beendet.

Die erwähnten Programmteile werden nachfolgend etwas genauer beschrieben.

#### **Verbindungsaufbau**

Der Verbindungsaufbau beschäftigt sich mit der Herstellung einer Datenverbindung mit den am Messsystem beteiligten Geräten (Hardware, *C.A 42*, und *FSH 3*). Eine funktionierende Kommunikation ist vor allem im Hinblick auf einen reibungslosen Ablauf der Messdatenerfassung notwendig.

Das Feldstärkemessgerät *C.A 42* und die Hardware können über die serielle Schnittstelle angesprochen werden (vgl. Abschnitt 3.1.2 bzw. Abschnitt 3.4.5.2).

Die Kommunikation mit dem Spektrumanalysator *FSH 3* funktioniert zwar physikalisch auch über die serielle Schnittstelle, jedoch läuft die Kommunikation über einen *VXIplug&play Instrument Driver* (vgl. Abschnitt 3.2.2), der von verschiedenen Programmiersprachen aus angesprochen werden kann.

### Messdatenerfassung und Vorverarbeitung

Die Messdatenerfassung, die eine funktionierende Kommunikation zu den beteiligten Komponenten voraussetzt, bildet das Kernstück der Software.

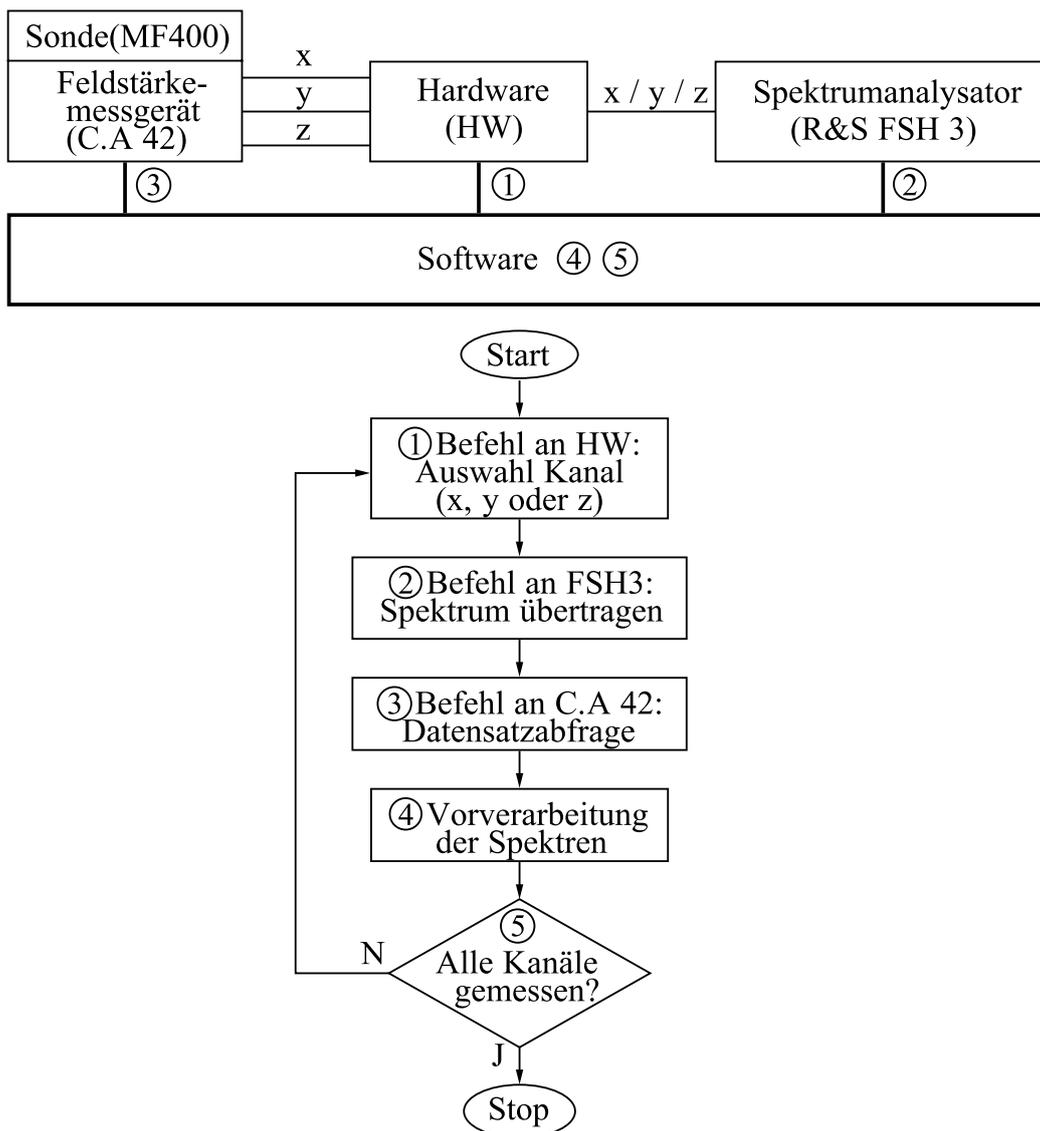


Abbildung 3.31: Ablauf der Messdatenerfassung

Der im Konzept des Messsystems (vgl. Abschnitt 3.10) beschriebene Ablauf beinhaltet die Messdatenerfassung und Vorverarbeitung, die sich aus den folgenden Prozessen zusammensetzen (vgl. Abbildung 3.31):

1. Das Programm schickt einen Befehl an die Hardware um den zu messenden Kanal auszuwählen. Nach dem Schaltvorgang liegt das über die Hardware ausgewählte Signal des Feldstärkemessgeräts *C.A 42* am Spektrumanalysator *FSH 3* an.
2. Nach dem Ablauf einer einstellbaren Verzögerungszeit (vgl. Abbildung 3.32) wird das gemessene Spektrum vom *FSH 3* an den PC übertragen. Diese Zeitverzögerung sollte etwas größer als die *Sweepzeit* des Spektrumanalysators gewählt werden. Die *Sweepzeit* (vgl. Abschnitt 3.2.1) beschreibt jene Zeitdauer die vom *FSH 3* benötigt wird um das Spektrum zu analysieren und ist abhängig vom eingestellten Frequenzdarstellbereich.
3. Um das gemessene Spektrum in der richtigen Einheit und Größenordnung darstellen zu können, wird der aktuelle Messbereich, sowie Offset und Normierungsfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* benötigt. Der diese Informationen enthaltende Datensatz des *C.A 42* kann über die serielle Schnittstelle ausgelesen werden (vgl. Abbildung 3.4). Ohne diese Parameter wäre keine Quantifizierung des gemessenen Signals möglich, weil das SONDENSIGNAL am Analogausgang in jedem Messbereich den gleichen Spannungsbereich abdeckt (vgl. Abschnitt 3.1). Nur anhand des Signals des Analogausgangs wäre es also nicht möglich festzustellen, ob die Magnetfeldsonde im kleinsten (200 nT) oder im größten Messbereich (20 mT) misst.
4. In diesem Schritt findet die Vorverarbeitung der Messwerte statt. Die durchgeführten Berechnungen erfolgen jeweils punktweise.
  - a) Das gemessene Spektrum wird am *FSH 3* in einer von fünf Einheiten angezeigt ( [dBm], [dBmV], [dB $\mu$ V], [V], [W]). Ist am Spektrumanalysator für die Anzeige nicht die Einheit Volt [V] ausgewählt, so muss für die Weiterverarbeitung eine Umrechnung in diese Einheit erfolgen. Dies kann mit den in Abschnitt 3.2.2 angegebenen Formeln geschehen.
  - b) Mit Hilfe der von *Chauvin Arnoux* zur Verfügung gestellten Formel (3.2) wird nun die Amplitude des Spektrums in die magnetische Flussdichte B [T] umgerechnet.

c) Im Anschluss kann die Miteinbeziehung der Kalibrierungsdaten der Messsonde *MF400* [14] (vgl. Abschnitt 3.1.2) erfolgen. Aufgrund der technischen Gegebenheiten des *FSH 3* kann eine Spektralanalyse erst ab 100 kHz durchgeführt werden. Somit ist speziell der Bereich von 100 kHz bis 400 kHz zu beachten. Die Korrekturfaktoren werden interpoliert und die Amplitudenwerte der einzelnen Frequenzen des Spektrums punktweise korrigiert.

5. Für die Messdatenerfassung der weiteren Kanäle müssen die Schritte (1) bis (4) wiederholt werden.

Der zeitliche Verlauf der Messdatenerfassung ist in Abbildung 3.32 dargestellt. Durch Wahl einer geeigneten Verzögerungszeit kann sichergestellt werden, dass das Spektrum erst ausgelesen wird, wenn die Spektralanalyse abgeschlossen ist. Die für die Frequenzanalyse benötigte Zeit, die als *Sweepzeit* bezeichnet wird, hängt, wie bereits erwähnt, vom eingestellten Frequenzdarstellbereich ab. Die maximale Umschaltdauer (15ms) ist durch die physikalischen Eigenschaften des Schalters *SEM133T* vorgegeben. Die bei der Messdatenerfassung auftretenden Zeiten werden in Tabelle 3.13 angeführt.

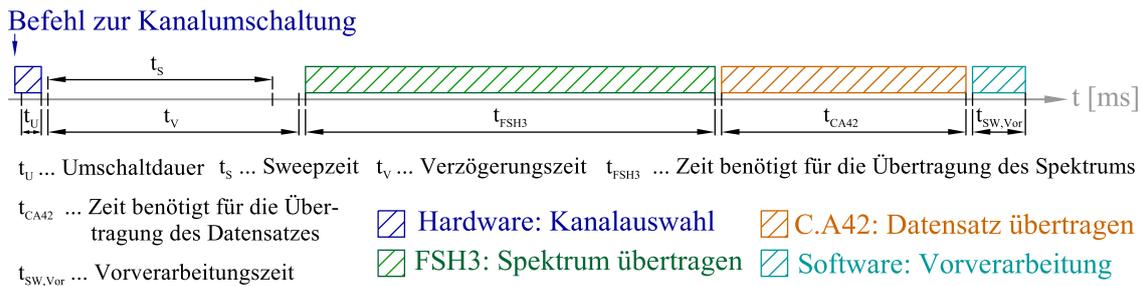


Abbildung 3.32: Zeitlicher Verlauf der Messdatenerfassung

### Einstellungen

Neben der Durchführung einer Einzelmessung, bei dem jeder Kanal einmal gemessen und anschließend das resultierende Spektrum berechnet wird, soll es auch möglich sein, eine kontinuierliche Messung über einen bestimmten Zeitraum durchzuführen. Dabei setzt sich die Messung aus mehreren Einzelmessungen zusammen. Folgende Einstellungen, den Messvorgang betreffend, können durchgeführt werden (vgl. Abbildung 3.33):

- **Gesamtmessdauer** ( $t_m$ ) - Ist die Zeitdauer vom Beginn der ersten bis zum Beginn der letzten Einzelmessung.

Zeit	Dauer	Bezeichnung
$t_U$	15 ms, <sup>1</sup>	Umschaltdauer
$t_S$	167 ms, <sup>2</sup>	Sweepzeit
$t_V$	$> t_S \approx 200$ ms	Verzögerungszeit
$t_{FSH3}$	ca. 320 ms, <sup>3 5</sup>	Zeit benötigt für die Übertragung des Spektrums vom <i>FSH 3</i>
$t_{CA42}$	ca. 180 ms, <sup>4 5</sup>	Zeit benötigt für die Übertragung des Datensatzes vom <i>CA 42</i>
$t_{SW,Vor}$	ca. 40 ms, <sup>5</sup>	Zeit benötigt für die Vorverarbeitung der übertragenen Daten

<sup>1</sup> maximale Umschaltdauer. Bedingt durch die physikalischen Eigenschaften des Schalters *SEM133T* (vgl. Abschnitt 3.4.3)

<sup>2</sup> je nach Konfiguration des *FSH 3*. bei automat. *Sweepzeit* und Frequenzdarstellbereich von 300kHz bis 400kHz)

<sup>3</sup> Baudrateneinstellung *FSH 3*: 115200 Baud, 301 Datenpunkte

<sup>4</sup> Baudrateneinstellung *CA 42*: 38400 Baud

<sup>5</sup> Bei mehreren Messungen variierten die gemessenen Zeiten bedingt durch die Systemauslastung des PCs.

Tabelle 3.13: Zeiten der Messdatenerfassung

- **Intervall ( $t_i$ )** - Der Intervall beschreibt die Zeitdauer von Beginn einer Einzelmessung bis zum Beginn der nächsten Einzelmessung.

Abhängig von der Einstellung der Gesamtmessdauer und des Intervalls wird eine bestimmte Anzahl an Messungen durchgeführt.

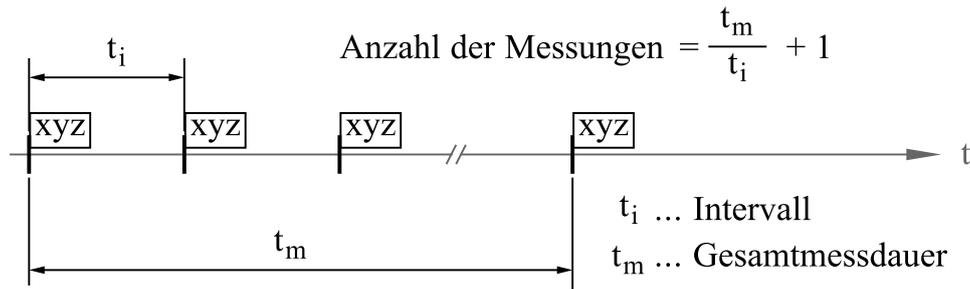


Abbildung 3.33: Einstellungen des Messvorgangs (Gesamtmessdauer und Intervall)

**Geräteeinstellungen** erfolgen üblicherweise direkt an den Messgeräten. Die von der Firma *Chauvin Arnoux* zur Verfügung gestellten Befehle ermöglichen eine Abfrage der Geräteeinstellungen und Messwerte des Feldstärkemessgeräts *CA42* über die Software, die Einstellungen müssen jedoch am Gerät selbst vorgenommen werden. Im Falle des Spektrumanalysator *FSH 3* besteht auch die Möglichkeit Einstellungen über einen Remotezugriff vom PC aus durchzuführen.

## Export

Der Export beschäftigt sich mit der Abspeicherung der gemessenen Rohdaten und der berechneten Ergebnisse.

Diese Einstellungen müssen vor Beginn des Messvorgangs durchgeführt werden, da die Daten nicht nur nach Abschluss, sondern auch kontinuierlich zwischen den Einzelmessungen abgespeichert werden. Diese Vorgehensweise bewährt sich vor allem bei längeren Messvorgängen, da im Falle eines Fehlers die Daten bis zu diesem Zeitpunkt gesichert wurden. Die Auslagerung der Rohdaten in eine Datei hält auch den internen Programm Speicherbedarf während des Messvorgangs klein.

Die Rohdaten, die sich aus dem vom *FSH 3* gemessenen Spektrum und dem Datensatz des *C.A 42* zusammensetzen, werden gemeinsam mit einem Header abgespeichert. Der Header enthält allgemeine Informationen zur Messung, sowie aktuelle Einstellungen des *FSH 3*. Auf den genauen Inhalt des Headers wird im Abschnitt der Programmierung näher eingegangen. Die Daten werden in der folgenden Reihenfolge in der Datei abgelegt:

<i>ROHDATEN.TXT</i>
[Header]
[Datensatz C.A 42]
[Spektrum FSH 3 (X)]
[Datensatz C.A 42]
[Spektrum FSH 3 (Y)]
[Datensatz C.A 42]
[Spektrum FSH 3 (Z)]
:
:
:

Nach Abschluss des Messvorgangs werden die gespeicherten Rohdaten gegebenenfalls aus der ausgelagerten Datei gelesen um die Berechnungen durchführen zu können. Die Ergebnisse werden danach in der folgenden Reihenfolge in der Datei abgelegt:

<i>ERGEBNISSE.TXT</i>
[Spektrum (X)]
[Spektrum (Y)]
[Spektrum (Z)]
[Spektrum (R)]

Eine genauere Beschreibung der Dateiformate erfolgt in Abschnitt 3.5.2.3.

### Berechnungen und grafische Ausgabe

Um einen Vergleich des gemessenen Spektrums mit Referenzwerten durchführen zu können, muss zunächst die entsprechende Ersatzgröße berechnet werden. Diese berechnet sich aus den Feldkomponenten der drei zueinander normalen Raumrichtungen  $(x, y, z)$  [7].

In diesem Fall setzt sich die Ersatzgröße aus den drei magnetischen Flussdichten  $(B_x, B_y, B_z)$  zusammen und wird in weiterer Folge als magnetische Ersatzflussdichte  $B_e$  bezeichnet [7]. Sie lässt sich nach (3.14) berechnen. Die Amplitudenwerte der einzelnen Frequenzen des Spektrums werden punktweise umgerechnet.

$$B_e = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.14)$$

Die Phasenlage der einzelnen Komponenten wird hier nicht berücksichtigt. Somit ist das berechnete Ergebnis größer oder gleich der tatsächlich auftretenden maximal magnetischen Flussdichte [7].

Erfolgen mehrere Messungen, so werden die einzelnen magnetischen Flussdichten  $B_i$  über die Anzahl der Messungen  $n$  gemittelt (3.15). Die Berechnung der gemittelten magnetischen Flussdichte  $\bar{B}$  erfolgt ebenfalls punktweise.

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.15)$$

Die berechnete Ersatzgröße kann nun mit den Referenzwerten verglichen werden. Die Referenzwerte für die magnetische Flussdichte  $B$  sind in Abbildung 3.34 dargestellt. Für das hier entwickelte Messsystem ist der Frequenzbereich von 100 kHz bis 400 kHz relevant.

Im Anschluss an die Berechnungen erfolgt die grafische Darstellung der Ergebnisse. Neben den Spektren sollen auch etwaige Überschreitungen der Referenzwerte in den Diagrammen dargestellt werden.

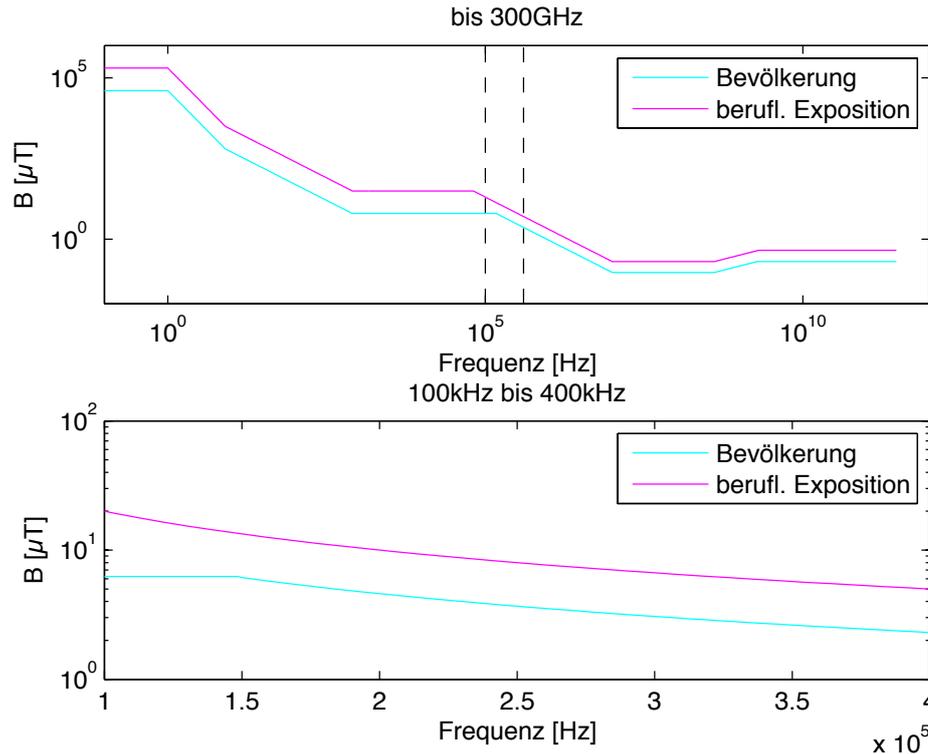


Abbildung 3.34: Referenzwerte für Exposition gegenüber zeitlich veränderlichen magnetischen Flussdichten nach [16][7]

### 3.5.2 Programmierung

Die Implementierung des beschriebenen Programmablaufs erfolgte in *Matlab*<sup>13</sup>. Die grafischen Benutzeroberflächen wurden mit Hilfe der integrierten GUI Entwicklungsumgebung (*GUIDE - GUI Design Environment*) erstellt.

Tabelle 3.14 enthält sämtliche für die programmierte Software generierten Quellcodedateien und eine kurze Beschreibung derselben. Da der prinzipielle Programmablauf schon im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurde, erfolgt in diesem Kapitel nur die Beschreibung einzelner wichtiger Programmteile. Zur Handhabung der Software wird an dieser Stelle an die beiliegende Gebrauchsanweisung verwiesen (vgl. Anhang Seite 91).

Das Hauptprogramm *main.m*, bildet zusammen mit der GUI Figure *main.fig* (Abbildung 3.35) die grafische Haupt-Benutzeroberfläche der Software (vgl. Abbildung 3.35).

<sup>13</sup>The MathWorks Inc., Matlab Version 7.5.0.342 (R2007b)

### 3 Methoden

<b>Dateiname</b>	<b>Bemerkung</b>
<i>main.m, main.fig</i>	Hauptprogramm (GUI)
<i>init.m</i>	Enthält Definitionen von Defaulteinstellungen die beim Programmstart geladen werden.
<i>cbrefresh.m</i>	Timer der Aktualisierungen in der GUI des Hauptprogramms durchführt ( <i>Timer Callback Function</i> ).
<i>about.m, about.fig</i>	Liefert allgemeine Programminformationen (GUI).
<i>ca42_serial.m</i>	Kommunikation mit dem Feldstärkemessgerät <i>C.A 42</i> (vgl. Seite 8) (Funktion)
<i>setConRsfs3.m</i>	Erstellt ein Schnittstellenobjekt für Kommunikation mit dem Spektrumanalysator <i>FSH 3</i> (Funktion).
<i>rsfs3ComSet.m</i>	Erzeugt <i>ResourceName</i> <sup>1</sup> und bereitet Port für Kommunikation mit <i>FSH 3</i> vor (Funktion).
<i>switchChannel.m</i>	Steuerung und Kommunikation mit der Hardware (vgl. Seite 44) (Funktion).
<i>setcomm.m, setcomm.fig</i>	Durchführen der Verbindungseinstellungen (Hardware, <i>C.A 42, FSH 3</i> ) (GUI).
<i>myrsfs3.mdd</i>	Driver für Kommunikation mit <i>R&amp;S FSH 3 (Matlab Instrument Driver Wrapper)</i>
<i>calcCyclesPerAxis.m</i>	Berechnet die durchzuführenden Messungen pro Achse - abhängig von den Messeinstellungen (Funktion).
<i>setmeasurment.m, setmeasurment.fig</i>	Einstellung des Parameter des Messvorgangs (vgl. Seite 49) (GUI).
<i>setrsfs3.m, setrsfs3.fig</i>	Durchführen von Einstellungen des <i>FSH 3</i> (GUI).
<i>setuc.m, setuc.fig</i>	Kommunikationstest mit der Hardware (GUI).
<i>setca42.m, setca42.fig</i>	Abfragen aktueller Einstellungen und Messwerte des <i>C.A 42</i> (GUI).
<i>loadData.m</i>	Lesen einer Rohdaten-Datei die durch <i>saveData.m</i> erstellt wurde (Funktion).
<i>saveData.m</i>	Ablegen von gemessenen Daten in eine Datei (Funktion)
<i>setexport.m, setexport.fig</i>	Durchführen der Exporteinstellungen (GUI).
<i>readSpectrumAxis.m</i>	Führt die Messdatenerfassung für einen Kanal durch (Funktion).
<i>calcTfromV.m</i>	Umrechnungsformel für die Berechnung der mag. Flussdichte anhand der gemessenen elektr. Spannung (vgl. Seite 8) (Funktion).
<i>evalRef.m</i>	Berechnung der Referenzwerte für einen bestimmten Frequenzbereich (Funktion).
<i>getCF.m</i>	Bestimmung der <i>Correction Factors</i> für einen bestimmten Frequenzbereich durch Interpolation (Funktion).
<i>implyCF.m</i>	Anwendung der <i>Correction Factors</i> auf ein Spektrum (Funktion).
<i>rsfs3_unitconversion.m</i>	Umrechnung der Anzeigeeinheiten ( <i>FSH 3</i> ) (vgl. Seite 16) (Funktion).
<i>mycbfct.m, mycbstrt.m, mycberror.m, mycbstop.m</i>	Diese Funktionen gehören zum Timer der den Messvorgang abwickelt. Sie beinhalten die Berechnungen und führen die grafische Ausgabe durch ( <i>Timer Callback Function, Start-, Error-, Stop- Function</i> ).
<i>clickaxis.m</i>	Neuerstellung eines Plots der Haupt-GUI in einem separaten Fenster (Funktion).
<i>plotspect.m</i>	Erstellung eines Plots und der Legende in externen Fenstern (Funktion).

<sup>1</sup> VISA Resource Name

Tabelle 3.14: Programmierte Matlab-Funktionen der Software

### 3 Methoden

Es ermöglicht die Durchführung von Einstellungen und Messungen und ist an der Darstellung der Ergebnisse beteiligt.

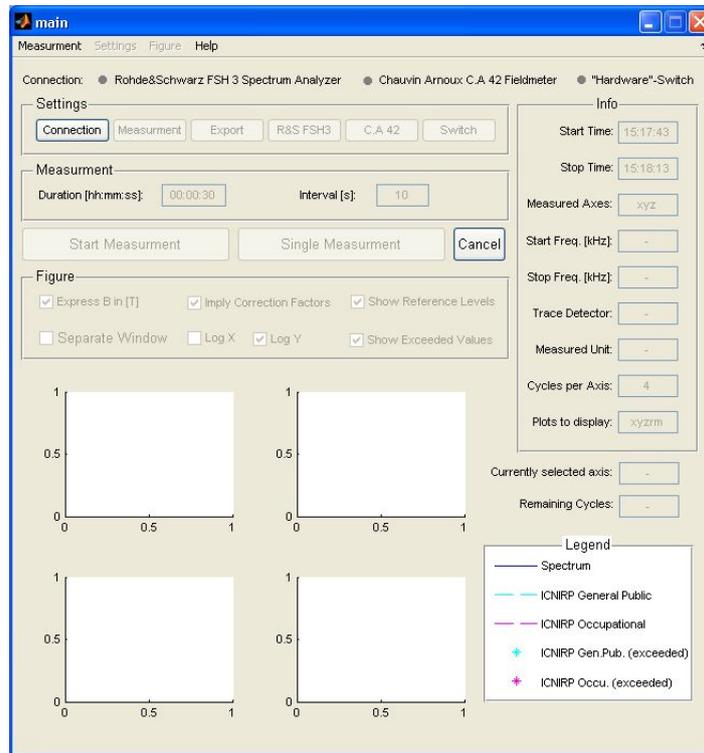


Abbildung 3.35: Hauptmenü (*main.fig*)

#### 3.5.2.1 Einstellungen

Einstellungen werden im Allgemeinen über die Untermenüs durchgeführt, die vom Hauptprogramm aus aufgerufen werden können. In diesem Abschnitt erfolgt eine Auflistung und eine kurze Beschreibung dieser Menüs.

##### "Connection"

Während der Programmausführung können die Kommunikationseinstellungen in der Hauptoberfläche des Programms durch Betätigen der *Connection*-Schaltfläche erfolgen (vgl. Abbildung 3.36). Für die drei beteiligten Geräte kann jeweils das verwendete Port und die Baudrate für die Kommunikation angegeben werden. Erst nach erfolgreichem Verbindungsaufbau zu den Geräten werden die anderen Untermenüs freigeschaltet. Im Hintergrund erfolgen Funktionsaufrufe die eine kurze Abfrage an die beteiligten Geräte schicken (*ca42\_serial.m*, *switchChannel.m*, *invoke*-Befehl).

### 3 Methoden

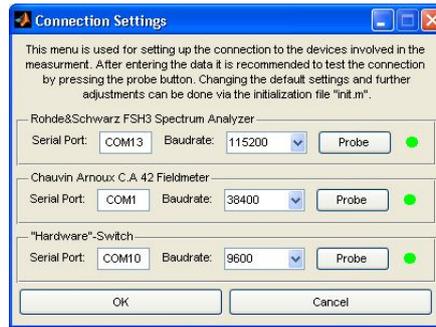


Abbildung 3.36: Kommunikationseinstellungen (*setcomm.fig*)

#### "Measurement"

Die Einstellung von Messdauer, Intervall und Verzögerungszeit erfolgt über das *Measurement*-Menü (vgl. Abbildung 3.37). Anhand dieser Einstellungen wird der Timer (*mycbfct.m*), der den Messvorgang startet, initialisiert. Über *Plot Selection* können die darzustellenden Spektren ausgewählt werden.

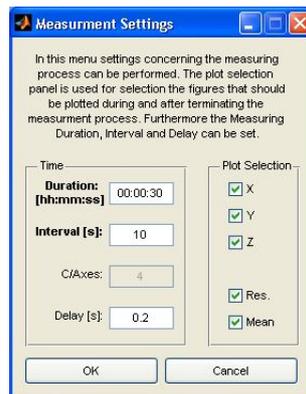


Abbildung 3.37: Einstellung der Messparameter (*setmeasurement.fig*)

#### "Export"

In diesem Menü (vgl. Abbildung 3.38) können Einstellungen für die Abspeicherung der Rohdaten und Ergebnisse durchgeführt werden. Der Aufruf der *saveData.m*-Funktion erfolgt abhängig von diesen Einstellungen.

### 3 Methoden

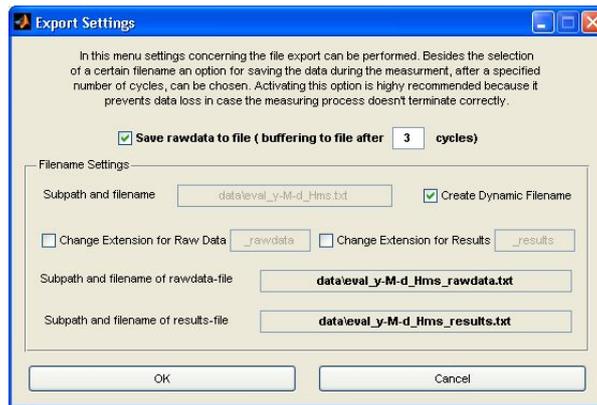


Abbildung 3.38: Exporteinstellungen (*setexport.fig*)

#### "C.A 42"

Über das Menü des Feldstärkemessgeräts (vgl. Abbildung 3.39) können aktuelle Messwerte und Einstellungen vom Messgerät abgefragt werden. Im Hintergrund erfolgt ein Aufruf der *ca42\_serial.m* Funktion, die den dafür erforderlichen Datensatz aus dem Messgerät ausliest.

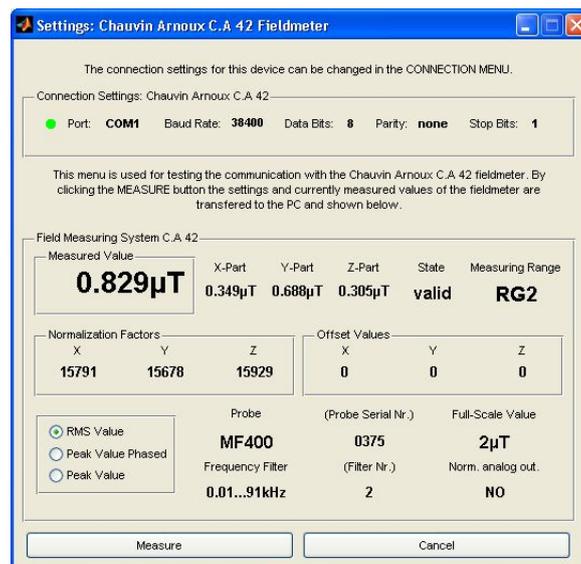


Abbildung 3.39: Einstellungen des Feldstärkemessgeräts *C.A 42* (*setca42.fig*)

#### "R&S FSH 3"

Das Menü des Spektrumanalysators (vgl. Abbildung 3.40) ermöglicht nicht nur die Abfrage der aktuellen Konfiguration, es ist auch möglich diverse Einstellungen des Geräts über einen Remotezugriff durchzuführen. Dafür wird der *Matlab VXIplug&play Driver*

(*myrsfsh3.mdd*) benötigt. Die Konfigurationsanweisungen für das Messgerät erfolgen über den *invoke*-Befehl (vgl. Abschnitt 3.5.2.2).

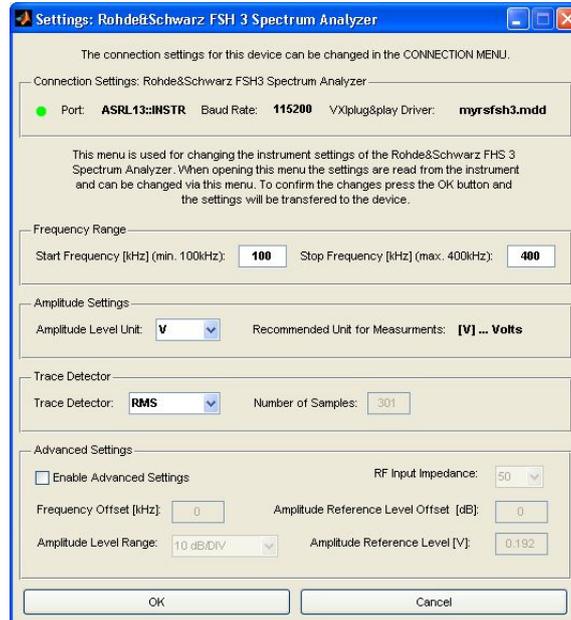


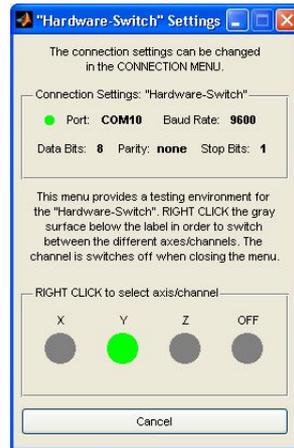
Abbildung 3.40: Einstellungen des Spektrumanalysators *FSH 3* (*setrsfsh3.fig*)

## "Switch"

Um die Funktion der Hardware testen zu können, muss in der Hauptoberfläche die *Switch*-Schaltfläche betätigt werden. Im erscheinenden Untermenü (vgl. Abbildung 3.41) kann durch Anklicken einer der Achsen, ein bestimmter Kanal eingeschaltet werden. Dabei wird im Hintergrund die Funktion *switchChannel.m* aufgerufen und der auszuwählende Kanal als Parameter übergeben. War dieser Vorgang erfolgreich, so erfolgt eine farbliche Markierung des ausgewählten Kanals.

### 3.5.2.2 Verbindungsaufbau

Grundlage für die Funktion des Messsystems ist ein funktionierender Datenaustausch mit den beteiligten Instrumenten. Da die Kommunikation mit den Messgeräten auf verschiedene Arten erfolgt, wird im Folgenden ein kurzer Überblick gegeben.

Abbildung 3.41: Hardwareeinstellungen (*setuc.fig*)

### Serielle Schnittstelle

Die über USB mit dem PC verbundene Hardware wurde so ausgelegt, dass sie durch einen VCP-Driver virtuell über die serielle Schnittstelle angesprochen werden kann (vgl. Abschnitt 3.4.5.2). Auch mit dem Feldstärkemessgerät *C.A 42* ist es möglich, durch die vom Gerätehersteller bereitgestellten Daten (vgl. Abbildung 3.4), über die serielle Schnittstelle zu kommunizieren.

In Matlab lässt sich eine serielle Verbindung relativ einfach mit Hilfe des Befehls *serial* erstellen. Über die Befehle *fprintf* und *fscanf* können Daten gesendet bzw. empfangen werden [9].

Diese Aufgabe wird vom Unterprogramm *ca42\_serial.m* (für den Feldstärkemessgerät *C.A 42*) bzw. *switchChannel.m* (für die Hardware) übernommen.

### VXIplug&play

Der Verbindungsaufbau mit dem Spektrumanalysator *FSH 3* erfolgt über den vom Hersteller zur Verfügung gestellten *VXIplug&play Driver* (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Überprüfung ob der Driver ordnungsgemäß installiert wurde, kann über den *Matlab*-Befehl *instrhwinfo* [9] erfolgen und sollte folgende Rückmeldung erzeugen:

```
» instrhwinfo('vxipnp')
ans =
    InstalledDrivers: {'rsfsh'}
    VXIPnRootPath: 'C:\Programme\IVI Foundation\VISA\WINNT'
```

### 3 Methoden

Um diesen Driver in *Matlab* nutzen zu können, wird ein eigener *Matlab VXiplugin Instrument Driver* benötigt, der auch oft als *VXiplugin Driver Wrapper* bezeichnet wird. Er ist erforderlich um ein Objekt für die Kommunikation mit dem Gerät zu erstellen und kann durch einen Aufruf des *Matlab*-Befehls *makemid* erzeugt werden. Unter Angabe des originalen *VXiplugin Instrument Drivers*, der zuvor durch *instrhwinfo* identifiziert wurde, wird nun der Driver für *Matlab* (*myrsfsh3.mdd*) erstellt [9].

```
» makemid('rsfsh', 'myrsfsh3')
```

Die bereits im Driver enthaltenen Funktionen für die Kommunikation mit dem Spektrumanalysator wurden um eine optimierte Funktion für die Übertragung des Spektrums erweitert. Dafür muss der Driver mit dem *Matlab Instrument Driver Editor* (*midedit* [9]), der Teil der Instrument Control Toolbox ist, bearbeitet werden. Unter der Gruppe *Functionexamples* wurde die Funktion *readtrace* hinzugefügt (vgl. Listing 3.1), die in Anlehnung an die bereits vorhandenen Funktionen programmiert wurde. Sie basiert auf der Instrument Driver Function *rsfsh\_readTraceData* [15].

Listing 3.1: Zum *Matlab VXiplugin Instrument Driver* hinzugefügte Funktion zum Auslesen des gemessenen Spektrums (*TraceData*) vom *R&S FSH 3*

```
1 function [TraceData, SamplesReturned] = readtrace(obj, TraceData)
2 % created by: Michael Schullin
3 % last modified: 2009-07-01 12:02
4
5 libname = get(get(obj, 'Parent'), 'DriverName');
6 session = get(get(obj, 'Parent'), 'Interface');
7 TraceData = libpointer('doublePtr', TraceData);
8 SamplesReturned = libpointer('int32Ptr', 0);
9
10 status = calllib(libname, 'rsfsh_readTraceData', session, TraceData, SamplesReturned);
11
12 TraceData = double(TraceData.Value);
13 SamplesReturned = double(SamplesReturned.Value);
14
15 if (status < 0)
16     errorMessage = libpointer('int8Ptr', repmat(10, 1, 512));
17     status = calllib(libname, 'rsfsh_error_message', session, status, errorMessage);
18     errorMessage = strtrim(char(errorMessage.Value));
19     error('The_instrument_returned_an_error_while_executing_the_function.\n%s', errorMessage)
20 end
```

Um eine Kommunikation mit dem Gerät über den Driver aufzubauen, ist zunächst die Erstellung eines sogenannten *Device Objects* nötig. Dies kann durch den *Matlab*-Befehl *icdevice* [9], wie folgt, geschehen:

```
obj_rsfs3 = icdevice('myrsfsh3.mdd', 'ASRL3::INSTR');
```

Neben der Angabe des *Driver Wrappers* muss auch die Angabe des sogenannten *VISA Resource Name*, der die Information des verwendeten seriellen Ports beinhaltet, erfolgen (in diesem Fall *COM3*). Die Erstellung dieses Objekts wird in der erstellten Software von der Funktion *setConRsfs3.m* übernommen.

Nach erfolgreichem Verbindungsaufbau (*Matlab*-Befehl: *connect*) kann nun ein gemessenes Spektrum (*TraceData*) ausgelesen werden. Der Aufruf der in Listing 3.1 dargestellten Funktion erfolgt über den Befehl *invoke* [9].

```
[TraceData, Samples] = invoke(obj_rsfs3.FunctionExamples1,  
'readtrace', TraceData);
```

Um alle Datenpunkte des gemessenen Spektrums auslesen zu können, muss das Array *TraceData* bereits vor dem *invoke*-Aufruf die richtige Dimension aufweisen. Die Anzahl der Datenpunkte ist abhängig von der gewählten *TraceDetector*-Einstellung des *FSH 3* (vgl. Seite 15).

#### 3.5.2.3 Export

Der Export ist für die Abspeicherung der Rohdaten und Ergebnisse verantwortlich, die jeweils in einer separaten Datei abgelegt werden sollen. Die Sicherung der Rohdaten erfolgt schon während des Messvorganges, um einen Datenverlust im Falle eines Fehlers zu vermeiden. Die Speicherung der Ergebnisse wird nach Abschluss der Messung durchgeführt.

Der Speichervorgang wird von der Funktion *saveData.m* übernommen, der die zu sichernden Daten in Matrixform übergeben werden können. Die Abspeicherung der Datenmatrix erfolgt dabei zeilenweise. Prinzipiell lässt die Funktion die Abspeicherung der folgenden drei Datensätze zu:

- *Header*
- *CA42Data* - Datensatz des Feldstärkemessgeräts *C.A 42*
- *TraceData* - Messwerte des Spektrumanalysators *FSH 3*

Der *Header* beinhaltet allgemeine Informationen zur Messung, sowie aktuelle Einstellungen, die das aus dem *FSH 3* ausgelesene Spektrum (*TraceData*) betreffen. Sein Aufbau ist in Abbildung 3.42 dargestellt.

[h01] , [h02] , [h03] , [h04] , [h05] , [h06] , [h07] , [h08] , [h09] , [h10]

[h01] ... Startzeitpunkt der Messung (YYYY-MM-DD hh:mm:ss.f)  
 [h02] ... Messdauer (0-0-0\* hh:mm:ss.f) \* ... nicht belegt  
 [h03] ... Intervall (ss.f) [h07] ... StartFrequency (FSH 3)  
 [h04] ... Verzögerungszeit (ss.f) [h08] ... StopFrequency (FSH 3)  
 [h05] ... gemessene Achsen (String, z.B: 'xyz') [h09] ... TraceDetector (FSH 3)  
 [h06] ... Messdurchläufe pro Achse [h10] ... AmplitudeLevelUnit (FSH 3)

Beispiel:

2010-02-05 13:19:59.378,0-0-0 0:0:30.000,10.000,0.200,xyz,4,100000.000,400000.000,4,6  
[h01] [h02] [h03] [h04] [h05] [h07] [h08] [h09]  
[h06] [h10]

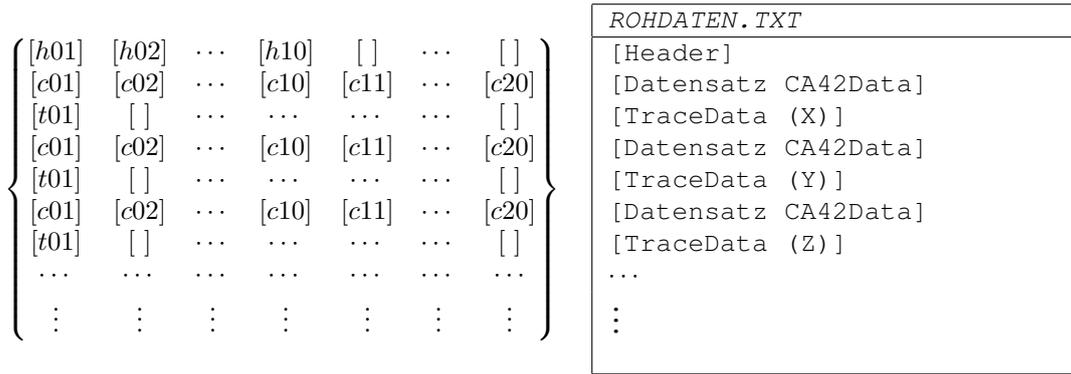
Abbildung 3.42: Aufbau des Datei-Headers

Beim Datensatz *CA42Data* (vgl. Abbildung 3.4) handelt es sich um die über die serielle Schnittstelle empfangene Antwort des Feldstärkemessgeräts auf den Befehl *send S*. Sie enthält die Informationen um das Spektrum in der richtigen Größenordnung darstellen zu können. Die einzelnen Parameter werden durch Komma getrennt abgespeichert.

Das Array *TraceData* beinhaltet das vom *FSH 3* gemessene Spektrum. Abhängig vom Parameter *TraceDetector* des *Headers* besteht der Datensatz aus 301 oder aus 602 Messwerten (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Einheit der Messwerte ist im Parameter *AmplitudeLevelUnit* enthalten und der Frequenzbereich lässt sich anhand von *StartFrequency* und *StopFrequency* bestimmen. Die einzelnen Messwerte des Spektrums werden ebenfalls durch Komma getrennt abgespeichert.

Abbildung 3.43 veranschaulicht den Aufbau einer aus diesen Datentypen bestehenden Matrix (*Matlab Cell-Array*), die der *saveData.m*-Funktion übergeben werden kann.

Die Matrix zur Speicherung der Ergebnisse ist ähnlich aufgebaut. Der Unterschied besteht darin, dass diese nur die berechneten Spektren enthält. Das Auslesen einer mit *saveData.m* erstellten Rohdaten-Datei, kann mit Hilfe der Funktion *loadData.m* erfolgen.



[h01] – [h10] ... Elemente des Datensatzes *Header*  
 [c01] – [c20] ... Elemente des Datensatzes *CA42Data*  
 [t01] ... Elemente des Datensatzes *TraceData* (301 oder 602 Werte)

Abbildung 3.43: Prinzipieller Aufbau der Rohdatendatei

### 3.5.2.4 Messdatenerfassung

Die Messdatenerfassung wurde in der Funktion *readSpectrumAxis.m* implementiert und läuft nach dem in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Schema ab. Diese Funktion beinhaltet die Messdatenaufnahme für eine Achse. Der gesamte Messvorgang für alle drei Kanäle kommt durch einen Aufruf dieser Funktion in einer *for*-Schleife des Timers *mycbfct.m* zu Stande.

Die Steuerung der Hardware wird von der Funktion *switchChannel.m* übernommen und der Datensatz des Feldstärkemessgeräts *CA 42* wird über die Funktion *ca42\_serial* ausgelesen. Die Übertragung des gemessenen Spektrums vom Spektrumanalysator *FSH 3* erfolgt über die in Abschnitt 3.5.2.2 beschriebene Funktion durch Aufruf des *invoke*-Befehls.

### 3.5.2.5 Berechnungen und grafische Ausgabe

#### Umrechnung der Anzeigeeinheit des *FSH 3*

Der Spektrumanalysator kann das gemessene Spektrum in verschiedenen Einheiten anzeigen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Umrechnung zwischen diesen wird von der Funktion *rsfsh3\_unitconversion.m* übernommen.

### Umrechnung in die magnetische Flussdichte

Die Funktion *calcTfromV.m* ermöglicht die Umrechnung des gemessenen Spannungssignals [V] in die magnetische Flussdichte [T]. Neben dem Spektrum wird dafür der Datensatz *CA42Data* des Feldstärkemessgeräts (vgl. Abbildung 3.4) und die Information um welchen Kanal es sich handelt (*x*, *y* oder *z*), benötigt. Die Berechnung erfolgt nach der von der Firma *Chauvin Arnoux* zur Verfügung gestellten Formel (3.2).

### Correction Factors

Mit Hilfe der Funktionen *getCF.m* und *implyCF.m* lassen sich die Kalibrierungsdaten der Messsonde *MF400* (vgl. Abbildung 3.5) miteinbeziehen. Da für diese Faktoren nur einzelne Messpunkte vorliegen, wird zwischen den einzelnen Punkten eine lineare Interpolation durchgeführt. Erfolgt eine Neukalibrierung der Messsonde, so können die neuen Korrekturfaktoren nach dem angegebenen Schema in die Matrix eingetragen werden.

### Referenzwerte

Die Referenzwerte werden über die Funktion *evalRef.m* berechnet. Sie sind in der Datei *init.m* definiert und lassen sich nach dem angegebenen Schema beliebig erweitern.

### Magnetische Ersatzflussdichte

Zu Beginn eines Messvorgangs wird ein Timer gestartet, der die Messdatenerfassung (*readSpectrumAxis.m*) im eingestellten Intervall über die eingestellte Messdauer wiederholt. Für diesen Timer wurde eine sogenannte *Timer Callback Function* (*mycbfct.m*) erstellt, die in gewissen Zeitabstände automatisch aufgerufen wird.

Innerhalb dieser Funktion wird der Messvorgang für alle beteiligten Kanäle durchgeführt und im Anschluss erfolgt die Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte (3.14) sowie deren grafische Darstellung.

### Mittelung

Die Mittelung (3.15) erfolgt nach dem letzten Aufruf der Timeroutine (*mycbfct.m*) in der *Stop Function* (*mycbstop.m*). Zunächst werden die für die Berechnung benötigten Daten aus der Rohdatendatei geladen. Nach Abschluss der Mittelung erfolgt eine grafische Ausgabe und die Ergebnisse werden gespeichert.

### 3.6 Versuchsaufbau für die Testmessungen

Die Überprüfung des Messsystems erfolgte am *Institut für Elektronik* der *TU Graz*. Dort wurde mit einer für EMV-Messungen gefertigten Spule ein magnetisches Feld im Frequenzbereich von 100 bis 400 kHz erzeugt. Das generierte Feld wurde anschließend mit dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten System gemessen.

Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 3.44 dargestellt. Prinzipiell besteht sie aus den folgenden drei Teilschritten:

- Erzeugung eines magnetischen Feldes in der Spule
- Messung des Stroms in der Spule
- Messung des magnetischen Feldes mit dem Messsystem

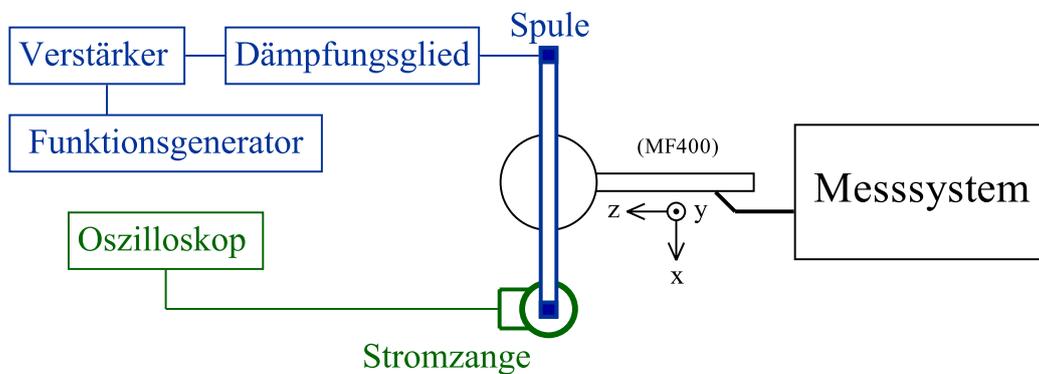


Abbildung 3.44: Aufbau für die Durchführung der Testmessungen

Die bei der Testmessung verwendeten Messgeräte sind Tabelle 3.15 angegeben.

Messgerät	Bezeichnung
Funktionsgenerator	<i>Farnell PSG1000B</i>
Verstärker	<i>Amplifier Research 50A220</i>
Dämpfungsglied	<i>JFW 50FH-006-100</i>
Spule	30x30cm, $k = 2.94 \frac{1}{m}$ , <sup>1</sup>
Oszilloskop	<i>Tektronix TDS 784A</i>
Stromzange	<i>Tektronix TCP202</i>
Messsystem	<sup>2</sup>

<sup>1</sup>  $k$  ... Spulenfaktor, der quadratischen Spule mit einer Windung. Zunächst über das *Biot-Savart*-Gesetz berechnet und dann nach anschließender Messung abgeglichen, da die Abmessungen der Spule nicht exakt 30x30cm betragen.

<sup>2</sup> Messsystem bestehend aus: Feldstärkemessgerät *C.A 42* mit Magnetfeldsonde *MF400*, Spektrumanalysator *FSH 3*, Hardware und Software

Tabelle 3.15: Bei den Testmessungen verwendete Geräte

### 3 Methoden

Mit einem Funktionsgenerator wurde über einen Verstärker und ein 6dB-Dämpfungsglied ein sinusförmiger Strom im Frequenzbereich von 100kHz bis 400kHz in die Spule eingespeist. Aus dem Stromfluss in der Spule resultiert ein magnetisches Feld. Um dessen magnetische Feldstärke bzw. dessen magnetische Flussdichte bestimmen zu können, muss die Größe des Stromes bekannt sein.

Dieser Strom wurde mit Hilfe einer Stromzange, die mit einem digitalen Speicheroszilloskop verbunden ist, bestimmt. Dabei wurde am Oszilloskop der Effektivwert des Stromes  $I$  gemessen und mittels FFT das Spektrum bestimmt.

Über einen aus der Geometrie der Spule bestimmten Faktor  $k$  (vgl. Anhang Seite 122) lässt sich nun mit Hilfe des Stromes  $I$  die magnetische Feldstärke  $H$  (3.16) berechnen. In weiterer Folge kann über die magnetische Permeabilität  $\mu$  die magnetische Flussdichte  $B$  (3.17) bestimmt werden.

$$H = I \cdot k \quad \text{mit} \quad k = 2.94 \frac{1}{\text{m}} \quad (3.16)$$

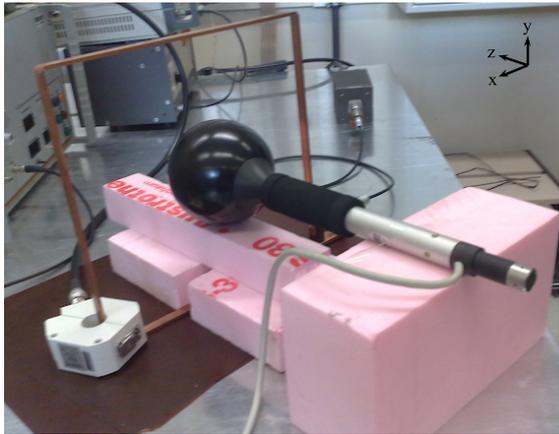
Die magnetische Permeabilität  $\mu$  setzt sich aus der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$  und der Permeabilitätszahl  $\mu_r$  des die Sonde umgebenden Mediums  $\mu_r$  zusammen.

$$\begin{aligned} B &= \mu \cdot H \quad \text{mit} \quad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \\ \mu_{r,\text{Luft}} &\approx 1 \end{aligned} \quad (3.17)$$

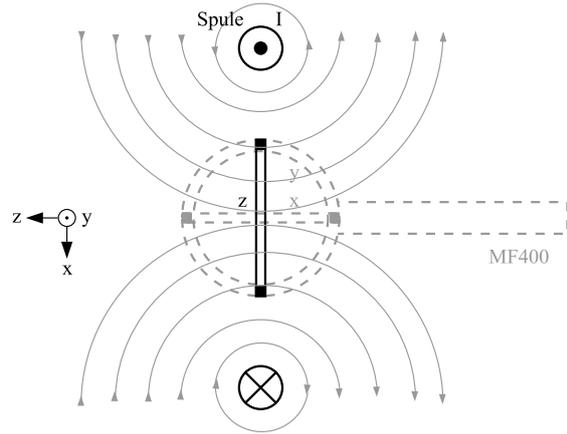
Um das rechnerisch ermittelte Ergebnis mit dem gemessenen Ergebnis des Messsystems vergleichen zu können, wird die Magnetfeldsonde *MF400* des Feldstärkemessgeräts in das Zentrum der Spule gebracht und mit Hilfe von Styroporplatten fixiert (vgl. Abbildung 3.45(a)). Da Styropor eine Permeabilitätszahl nahe bei eins besitzt und zu einem großen Teil aus Luft besteht, kommt es zu keinen störenden Feldverzerrungen.

Das in Abbildung 3.45(a) dargestellte Koordinatensystem bezieht sich auf die in der Messsonde orthogonal angeordneten Messspulen. Der Theorie zufolge (vgl. Abbildung 3.45(b)) müsste bei dieser Anordnung, von Messsonde zur felderzeugenden Spule, eine magnetische Flussdichte in der  $z$ -Achse gemessen werden. Durch die Position der  $z$ -Spule im Inneren der Messsonde kommt es zu einer Spannungsinduktion.

### 3 Methoden



(a) Position der Messsonde



(b) Theoretische Feldverteilung der stromdurchflossenen Spule bei der gegebenen Position

Abbildung 3.45: "z-Position" der Magnetfeldsonde *MF400*

In einer weiteren Versuchsanordnung wurde die Magnetfeldsonde schräg zur Spule positioniert um eine Induktion in allen drei Messspulen der Sonde zu erreichen (vgl. Abbildung 3.46).



Abbildung 3.46: "x/y/z-Position" der Magnetfeldsonde *MF400*

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden in Abschnitt 4 angegeben.

### 3.7 Analyse der Messunsicherheit

Bevor die in Abschnitt 4.1 angegebenen Ergebnisse der Testmessungen präsentiert werden, wird eine Analyse der zu erwartenden Messunsicherheiten durchgeführt. Zunächst wurden die Quellen der Unsicherheiten identifiziert und in Tabelle 3.16 und Tabelle 3.17 angegeben.

#### Messunsicherheiten des Feldstärkemesssystems *C.A 42*

Bei der Messung der magnetischen Flussdichte mit dem Feldstärkemessgerät *C.A 42* und der Messsonde *MF400* muss die Messunsicherheit dieses Gesamtsystems ( $\pm 3\% \pm 4$  digits, vgl. Tabelle 3.1) berücksichtigt werden. Zusätzlich sind die Korrekturfaktoren, aufgrund des bei der Kalibrierung vorherrschenden magnetischen Feldes, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ( $\pm 15\%$ , vgl. Abschnitt 3.1.2). Diese Unsicherheiten sind in Tabelle 3.16 zusammengefasst.

Unsicherheit aufgrund der Kalibrierung der Messsonde <i>MF400</i>	Messunsicherheit des Feldstärkemessgeräts <i>C.A42</i> + <i>MF400</i>
$u_{CF}$	$u_{CA42}$
$\pm 15\%$	$\pm 3\% + 4\text{digits}$

Tabelle 3.16: Messunsicherheiten des Feldstärkemesssystems *C.A 42*

#### Messunsicherheit des entwickelten Messsystems

Wird das entwickelte Messsystem betrachtet, so ergeben sich die folgenden Messunsicherheiten. Die Messabweichung der Magnetfeldsonde allein *MF400* wurde mit  $\pm 3\%$  angenommen. Weiters muss der Fehler in der Pegelanzeige des Spektrumanalysators *FSH 3* berücksichtigt werden (liegt laut Hersteller im Bereich von 1,5 dB, vgl. Abschnitt 3.2.2) und die Unsicherheit der Korrekturfaktoren wird miteinbezogen. Die Messunsicherheiten des entwickelten Systems sind in Tabelle 3.17 angeführt. Durch die Fehlerangabe in Dezibel ergeben sich nach der Umrechnung in Prozent unterschiedliche Grenzen für den positiven und negativen Bereich.

### 3 Methoden

Unsicherheit aufgrund der Kalibrierung der Messsonde <i>MF400</i>	Messunsicherheit der Magnetfeldsonde <i>MF400</i>	Pegelfehler des Spektrumanalysators <i>FSH 3</i>
$u_{CF}$	$u_{MF400}$	$u_{FSH3}$
$\pm 15 \%$	$\pm 3 \%$	$\pm 1,5 \text{ dB} = \begin{cases} +18,85 \% \\ -15,86 \% \end{cases}$

Tabelle 3.17: Messunsicherheiten des entwickelten Messsystems

Das Messsystem erfasst die magnetische Flussdichte  $B$  nicht direkt. Es erfolgt die Messung einer in der Magnetfeldsonde induzierten Spannung  $U$ , die anschließend in die magnetische Flussdichte umgerechnet wird. Die dafür verwendete lineare Funktion (3.2) verursacht keine Fortpflanzung der Unsicherheit, da die gemessene Spannung mit einem konstanten Faktor  $k$  multipliziert wird (3.18).

$$B = f(U) = k \cdot U \quad (3.18)$$

Um die gesamte Unsicherheit  $u_{SYS}$  des Messsystems bestimmen zu können, wird schrittweise vorgegangen. Die in Tabelle 3.17 angegebenen Unsicherheiten wirken auf alle auf die magnetische Flussdichte  $B$ . Wirken zwei Unsicherheiten ( $u_1, u_2$ ) in einer Messkette auf die gleiche Größe, so lässt sich das mathematisch durch (3.19) beschreiben. Die resultierende Unsicherheit  $u$  ergibt sich zu (3.20).

$$B + B \cdot u = (B + B \cdot u_1) + (B + B \cdot u_1) \cdot u_2 \quad (3.19)$$

$$u = u_1 + u_2 + u_1 \cdot u_2 \quad (3.20)$$

Wird (3.20) herangezogen um die Unsicherheit  $u_{MF400,FSH3}$  aus  $u_{MF400}$  und  $u_{FSH3}$  zu berechnen, so ergibt sich (3.21).

$$u_{MF400,FSH3} = u_{MF400} + u_{FSH3} + u_{MF400} \cdot u_{FSH3} = \begin{cases} +22,42 \% \\ -18,38 \% \end{cases} \quad (3.21)$$

Im nächsten Schritt wird die gesamte Unsicherheit des Messsystems  $u_{SYS}$  berechnet. Dafür wird wiederum  $u_{MF400,FSH3}$  und  $u_{CF}$  in (3.20) eingesetzt.  $u_{SYS}$  ergibt sich zu (3.22).

$$u_{SYS} = u_{MF400,FSH3} + u_{CF} + u_{MF400,FSH3} \cdot u_{CF} = \begin{cases} +40,78 \% \\ -30,63 \% \end{cases} \quad (3.22)$$

### Fortpflanzung der Messunsicherheit durch Berechnung von $B_e$

In weiterer Folge wird analysiert ob sich durch die Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte  $B_e$  nach (3.23) (vgl. (3.14)) eine Fortpflanzung der Messunsicherheit ergibt.

$$B_e = f(B_x, B_y, B_z) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.23)$$

Dabei kann jede der vorkommenden Feldkomponenten ( $B_x, B_y, B_z$ ) eine Messunsicherheit ( $u_x, u_y, u_z$ ) aufweisen. Da sich die drei gemessenen Größen (Feldkomponenten) nur im gewählten Kanal unterscheiden, weisen sie alle die gleiche Messunsicherheit  $u_{\text{SYS}}$  auf (3.24).

$$u_x = u_y = u_z = u_{\text{SYS}} \quad (3.24)$$

Somit ergibt sich (3.23) zu (3.25).

$$B_e + u = \sqrt{(B_x + B_x \cdot u_{\text{SYS}})^2 + (B_y + B_y \cdot u_{\text{SYS}})^2 + (B_z + B_z \cdot u_{\text{SYS}})^2} \quad (3.25)$$

In diesem Sonderfall lässt sich die Messunsicherheit nach Umformung herausheben. Die Messunsicherheit der berechneten magnetischen Ersatzflussdichte ergibt sich zu (3.26).

$$u = u_{\text{SYS}} \quad (3.26)$$

Das bedeutet, dass sich die gesamte Messunsicherheit des Systems bei der Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte nicht erhöht, weil alle Kanäle mit der gleichen Messunsicherheit gemessen werden.

# 4 Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit lassen sich in zwei Teile gliedern. Einerseits werden in diesem Kapitel die Resultate der Testmessung besprochen, die durchgeführt wurde, um das entwickelte System zu überprüfen. Andererseits wird auch das Messsystem mit seinen einzelnen Komponenten als Ergebnis dieser Arbeit betrachtet.

## 4.1 Ergebnisse der Testmessungen

Die Testmessungen wurden mit dem in Abschnitt 3.6 beschriebenen Aufbau durchgeführt. Aufgrund der Limitierungen des Testaufbaus konnten nur magnetische Felder im Nanoteslabereich erzeugt werden. Die Messungen beschränkten sich somit auf die beiden untersten Messbereiche der Magnetfeldsonde *MF400*. Durch die Testmessungen sollte die prinzipielle Funktionsweise des Messsystems dargelegt und geprüft werden. Auf Betrachtungen, die die Homogenität des erzeugten Magnetfeldes betreffen, wird verzichtet und es kann keine Unsicherheit für das erzeugte Feld angegeben werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Einzel- und der kontinuierlichen Messungen präsentiert.

### 4.1.1 Einzelmessungen

Bei einer Einzelmessung wird jeder Kanal  $(x,y,z)$  einmal gemessen und anschließend das resultierende Spektrum, die magnetische Ersatzflussdichte, berechnet.

## 4.1.1.1 Messung bei "z-Position"

Zunächst erfolgte eine Positionierung der Sonde, sodass das magnetische Feld nur an der  $z$ -Achse auftreten kann (vgl. Abbildung 3.45). Im Anschluss wurde ein sinusförmiger Strom mit einer Frequenz von 200kHz durch die Spule geleitet. Eine Einzelmessung wurde gestartet und die Spektren der drei orthogonalen Raumrichtungen aufgenommen.

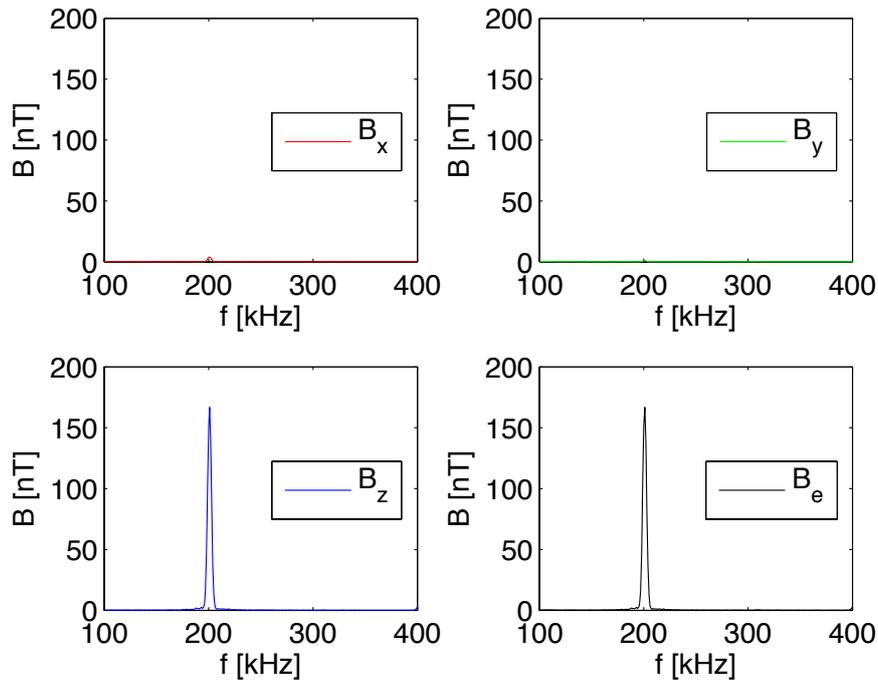


Abbildung 4.1: Einzelmessung - Gemessene Spektren bei "z-Position"

Aufgrund der gewählten Position der Magnetfeldsonde ergibt sich die erwartete Feldverteilung (vgl. Abbildung 4.1). Für die folgenden Betrachtungen wird daher nur die magnetische Flussdichte an der  $z$ -Achse  $B_z$  betrachtet. Die Einflüsse von  $B_x$  und  $B_y$  werden vernachlässigt.

Bei den Messungen wurden sinusförmige Ströme unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen durch die Spule geleitet, um in den beiden untersten Messbereichen der Magnetfeldsonde Messungen durchführen zu können. Tabelle 4.1 enthält die dabei aufgenommenen Werte. Aufgrund der Feldverteilung wurden nur die Messwerte der  $z$ -Achse berücksichtigt. Die Korrekturfaktoren der Sonde wurden sowohl beim Messwert des *C.A 42* als auch bei den Messwerten des Messsystems miteinbezogen. Der vom *C.A 42* gemessene Werte wurde bei Messung der  $z$ -Achse aus dem übertragenen Datensatz ent-

## 4 Ergebnisse

nommen, um eine Verfälschung des Ergebnisses zu vermeiden (vgl. Abschnitt 5.3). Der vom Messsystem erfasste Wert ist bei der entsprechenden Frequenz aus dem Spektrum abgelesen worden.

Messbereich 1 (bis 200nT)					Messbereich 2 (bis 2μT)				
<b>f</b> [kHz]	<b>I</b> [mA]	$B^1$ [nT]	$B_{z,CA42}^2$ [nT]	$B_{z,SYS}^3$ [nT]	<b>f</b> [kHz]	<b>I</b> [mA]	$B^1$ [nT]	$B_{z,CA42}^2$ [nT]	$B_{z,SYS}^3$ [nT]
200	49,9	184,36	192,72	166,63	200	150	554,18	551,73	498,8
250	50,3	185,83	182,48	165,35	250	149,4	551,96	544,68	498,62
300	49,8	183,99	177,53	155,75	300	149,9	553,81	542,02	480,06
350	49,9	184,36	168,69	144,55	350	150,3	555,29	530,16	460,28

<sup>1</sup> Aus dem die Spule durchfließenden Strom  $I$  berechnete magnetische Flussdichte  $B$  nach (3.16) und (3.17).

<sup>2</sup> Vom Feldstärkemessgerät *C.A 42* gemessene magnetische Flussdichte multipliziert mit dem Korrekturfaktor der Magnetfeldsonde *MF400* (vgl. Abschnitt 3.1.2) der entsprechenden Frequenz  $f$ . Der Messwert wurde aus dem übertragenen Datensatz vom *C.A 42* nach Messung der  $z$ -Achse entnommen.

<sup>3</sup> Vom Messsystem gemessener Wert der die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* beinhaltet. Er wurde aus dem Spektrum bei der entsprechenden Frequenz  $f$  abgelesen.

Tabelle 4.1: Einzelmessung bei "z-Position" - Messwerte (Auszug aus der Tabelle auf Seite 127 im Anhang)

Für die Erstellung von Abbildung 4.2 wurden die angegebenen Messunsicherheiten der verwendeten Komponenten (vgl. Abschnitt 3.7) berücksichtigt. Um die auftretende Messunsicherheit zu verdeutlichen, wurden sie ausgehend von den gemessenen Einzelwerten aufgetragen und sind durch die dargestellten Balken gekennzeichnet.

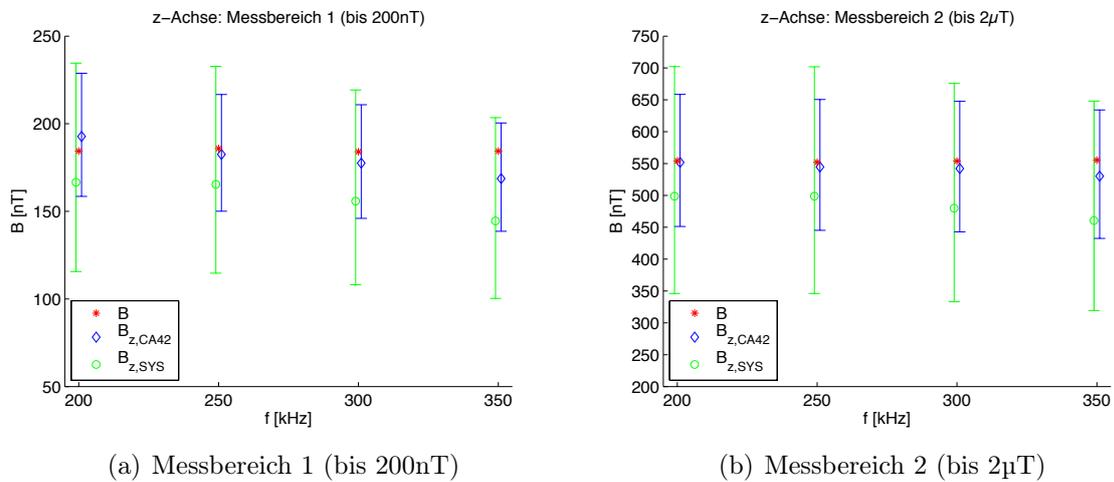


Abbildung 4.2: Einzelmessung bei "z-Position" - Darstellung der Messwerte und Messunsicherheiten nach Tabelle 4.1

#### 4.1.1.2 Messung bei "x/y/z-Position"

Bei einer zweiten Versuchsanordnung wurde die Magnetfeldsonde schräg zur Spule positioniert, sodass eine magnetische Flussdichte in allen drei Achsen der Messsonde gemessen werden kann (vgl. Abbildung 3.46). Abbildung 4.3 zeigt die bei dieser Sondenposition gemessenen Spektren der magnetischen Flussdichte.

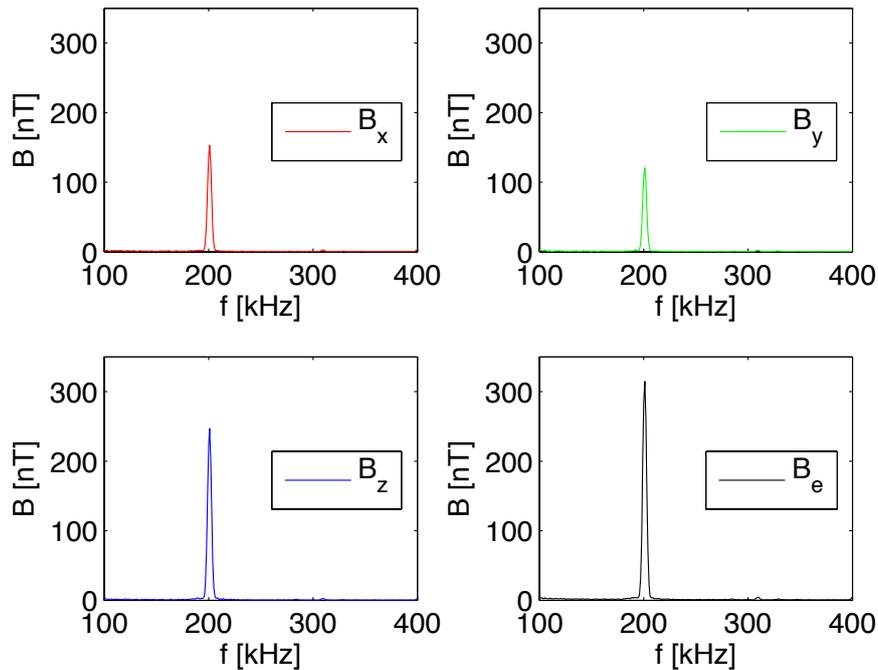


Abbildung 4.3: Einzelmessung - Gemessene Spektren bei "x/y/z-Position"

Es wurde wiederum ein sinusförmiger Strom in die Spule eingespeist und die in Tabelle 4.2 angeführten Messwerte aufgenommen. Im Gegensatz zur vorangegangenen Messung wurde, aufgrund der sich ergebenden Feldverteilung, die magnetische Ersatzflussdichte  $B_e$  (3.14) betrachtet. Die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde wurden sowohl beim Messwert des *CA 42* als auch bei den Messergebnissen des Messsystems miteinbezogen. Die vom *CA 42* gemessenen Werte wurden jeweils nach Messung der einzelnen Kanäle aus dem übertragenen Datensatz entnommen, um eine Verfälschung des Ergebnisses zu vermeiden (vgl. Abschnitt 5.3). Anschließend erfolgte die Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte nach (3.14). Der vom Messsystem erfasste Wert wurde bei der entsprechenden Frequenz aus dem Spektrum abgelesen.

## 4 Ergebnisse

Messbereich 2 (bis 2μT)

<b>f</b> [kHz]	<b>I</b> [mA]	$B^1$ [nT]	$B_{e,CA42}^2$ [nT]	$B_{e,SYS}^3$ [nT]
200	100	369,45	363,21	314,43
250	99,7	368,34	355,28	317,38
300	100,2	370,19	349,27	306,82

<sup>1</sup> Aus dem die Spule durchfließenden Strom  $I$  berechnete magnetische Flussdichte  $B$  nach (3.16) und (3.17).

<sup>2</sup> Vom Feldstärkemessgerät *C.A 42* gemessene magnetische Flussdichte multipliziert mit dem Korrekturfaktor der Magnetfeldsonde *MF400* (vgl. Abschnitt 3.1.2) der entsprechenden Frequenz  $f$ . Die Messwerte wurden an den übertragenen Datensätzen vom *C.A 42* nach Messung der einzelnen Achsen entnommen und anschließend zur magnetischen Ersatzflussdichte (3.14) zusammengesetzt.

<sup>3</sup> Vom Messsystem gemessener Wert der die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* beinhaltet. Er wurde aus dem Spektrum bei der entsprechenden Frequenz  $f$  abgelesen.

Tabelle 4.2: Einzelmessung bei " $x/y/z$ -Position" - Messwerte (Auszug aus der Tabelle auf Seite 127 im Anhang)

Bei der Erstellung von Abbildung 4.4 wurden die auftretenden Messunsicherheiten berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.7). Zur Verdeutlichung wurden sie ausgehend von den gemessenen Einzelwerten aufgetragen und sind durch die dargestellten Balken gekennzeichnet.

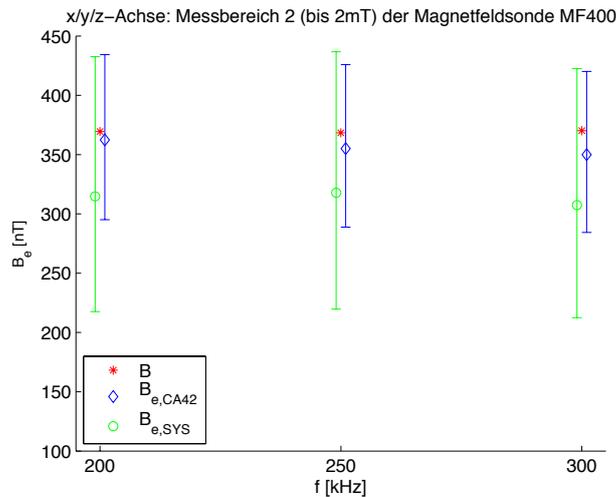


Abbildung 4.4: Einzelmessung bei " $x/y/z$ -Position" - Darstellung der Messwerte und Messunsicherheiten nach Tabelle 4.2

### 4.1.2 Kontinuierliche Messung

Bei einer kontinuierlichen Messung wird der Messvorgang in einem bestimmten Intervall über die eingestellte Gesamtdauer wiederholt. Die Ergebnisse werden über die Messdauer gemittelt und ausgegeben.

#### 4.1.2.1 Messung bei "z-Position"

Bei der Durchführung einer kontinuierlichen Messung erfolgte die Positionierung der Sonde zunächst nach Abbildung 3.45, sodass das magnetische Feld nur an der  $z$ -Achse der Magnetfeldsonde auftreten konnte. Ein sinusförmiger Strom wird eingespeist und eine Messung durchgeführt. Das sich ergebende Spektrum ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Mittelwerte der aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 4.3 angegeben. Aufgrund der sich ergebenden Feldverteilung ist es ausreichend, wenn die  $z$ -Achse betrachtet wird.

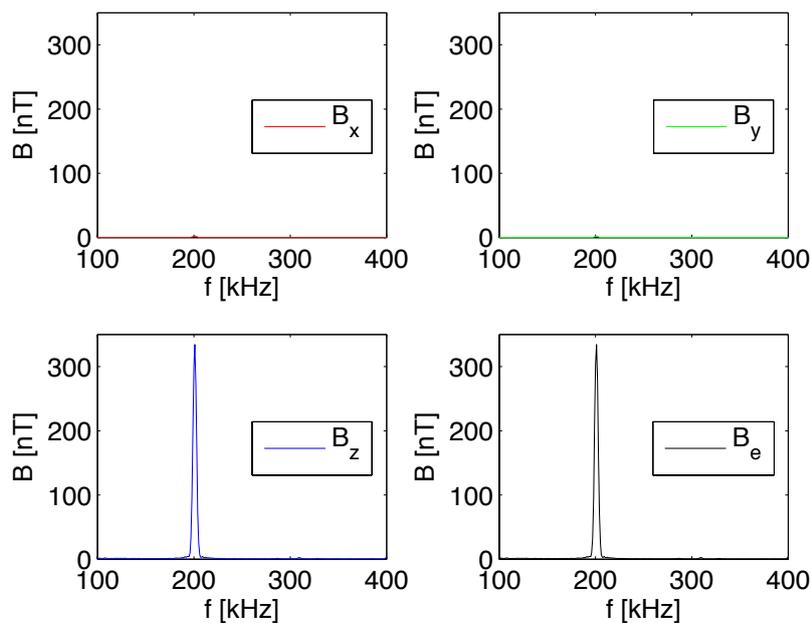


Abbildung 4.5: Kontinuierliche Messung - Gemessene Spektren bei "z-Position"

Die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde wurden sowohl beim Messwert des *C.A 42* als auch bei den Messwerten des Messsystems miteinbezogen. Der vom *C.A 42* gemessene Werte wurde nach Messung der  $z$ -Achse aus dem übertragenen Datensatz entnommen.

## 4 Ergebnisse

Der vom Messsystem erfasste Werte wurde bei der entsprechenden Frequenz aus dem Spektrum abgelesen.

Messbereich 2 (bis 2 $\mu$ T)

<b>f</b> [kHz]	<b>I</b> [mA]	$B^1$ [nT]	$B_{z,CA42}^2$ [nT]	$B_{z,SYS}^3$ [nT]
200	100	369,45	381,6	334,05

<sup>1</sup> Aus dem die Spule durchfließenden Strom  $I$  berechnete magnetische Flussdichte  $B$  nach (3.16) und (3.17).

<sup>2</sup> Vom Feldstärkemessgerät *C.A 42* gemessene magnetische Flussdichte multipliziert mit dem Korrekturfaktor der Magnetfeldsonde *MF400* (vgl. Abschnitt 3.1.2) der entsprechenden Frequenz  $f$ . Der Messwert wurde aus dem übertragenen Datensatz vom *C.A 42* nach Messung der  $z$ -Achse entnommen.

<sup>3</sup> Vom Messsystem gemessener Wert der die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* beinhaltet. Er wurde aus dem Spektrum bei der entsprechenden Frequenz  $f$  abgelesen.

Tabelle 4.3: Kontinuierliche Messung bei "z-Position" - Messwerte (Auszug aus der Tabelle auf Seite 128 im Anhang)

Die auftretenden Messunsicherheiten (vgl. Abschnitt 3.7) werden in Abbildung 4.6, ausgehend von den errechneten Mittelwerten, aufgetragen.

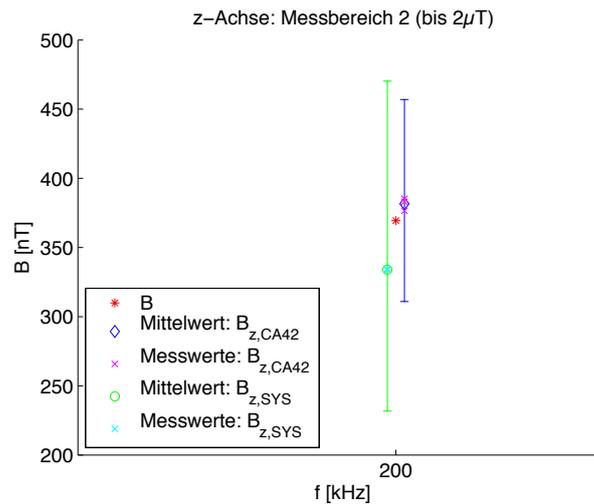


Abbildung 4.6: Kontinuierliche Messung bei "z-Position" - Darstellung der Messwerte und Messunsicherheiten nach Tabelle 4.4

### 4.1.2.2 Messung bei "x/y/z-Position"

Für die zweite kontinuierliche Messung wurde die Sonde wiederum schräg zur Spule positioniert (vgl. Abbildung 3.46), sodass die magnetische Flussdichte in allen drei Raumachsen der Sonde gemessen werden kann. Das sich bei einem sinusförmigen Strom

## 4 Ergebnisse

ergebende Spektrum ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Für die folgenden Betrachtungen wird die magnetische Ersatzflussdichte  $B_e$  herangezogen.

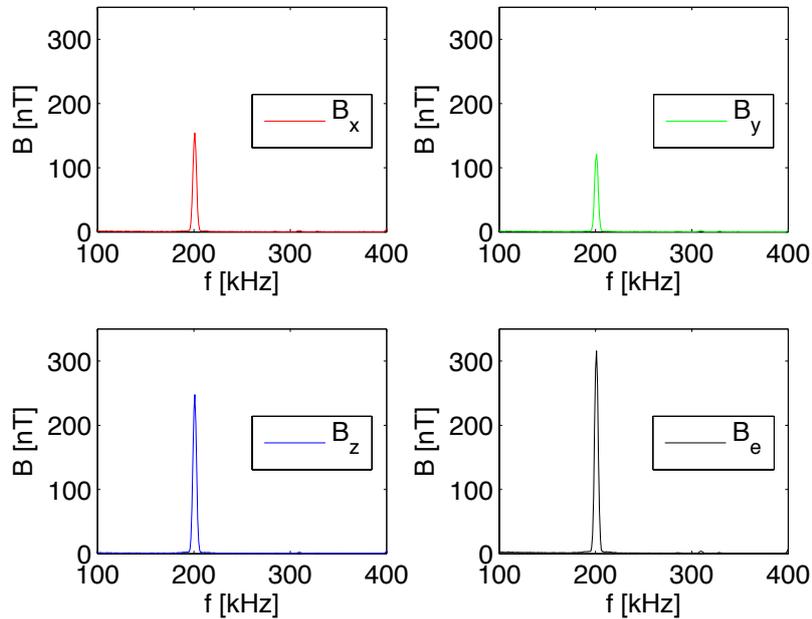


Abbildung 4.7: Kontinuierliche Messung - Gemessene Spektren bei "x/y/z-Position"

Kontinuierliche Messungen bei Strömen verschiedener Frequenzen wurden durchgeführt und Messwerte aufgenommen. Tabelle 4.4 enthält die daraus berechneten Mittelwerte der magnetischen Ersatzflussdichte  $B_e$ . Die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde wurden sowohl beim Messwert des *CA 42* als auch bei den Messergebnissen des Messsystems miteinbezogen. Die vom *CA 42* gemessenen Werte wurden jeweils nach Messung der einzelnen Kanäle aus dem übertragenen Datensatz entnommen. Anschließend erfolgte die Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte nach (3.14). Der vom Messsystem erfasste Wert wurde bei der entsprechenden Frequenz aus dem Spektrum abgelesen.

Abbildung 4.8 zeigt, die nach Abschnitt 3.7 auftretenden Messunsicherheiten, die ausgehend von den berechneten Mittelwerten aufgetragen wurden.

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5.1.

## 4 Ergebnisse

Messbereich 2 (bis 2 $\mu$ T)

<b>f</b> [kHz]	<b>I</b> [mA]	$B^1$ [nT]	$B_{e,CA42}^2$ [nT]	$B_{e,SYS}^3$ [nT]
200	99,9	369,08	361,98	315,38
250	100,3	370,56	354,64	318,82
300	100,3	370,56	348,25	308,11

<sup>1</sup> Aus dem die Spule durchfließenden Strom  $I$  berechnete magnetische Flussdichte  $B$  nach (3.16) und (3.17).

<sup>2</sup> Vom Feldstärkemessgerät *C.A 42* gemessene magnetische Flussdichte multipliziert mit dem Korrekturfaktor der Magnetfeldsonde *MF400* (vgl. Abschnitt 3.1.2) der entsprechenden Frequenz  $f$ . Die Messwerte wurden aus den übertragenen Datensätzen vom *C.A 42* nach Messung der einzelnen Achsen entnommen und anschließend zur magnetischen Ersatzflussdichte (3.14) zusammengesetzt.

<sup>3</sup> Vom Messsystem gemessener Wert der die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde *MF400* beinhaltet. Er wurde aus dem Spektrum bei der entsprechenden Frequenz  $f$  abgelesen.

Tabelle 4.4: Kontinuierliche Messung bei "x/y/z-Position" - Messwerte (Auszug aus der Tabelle auf Seite 128 im Anhang)

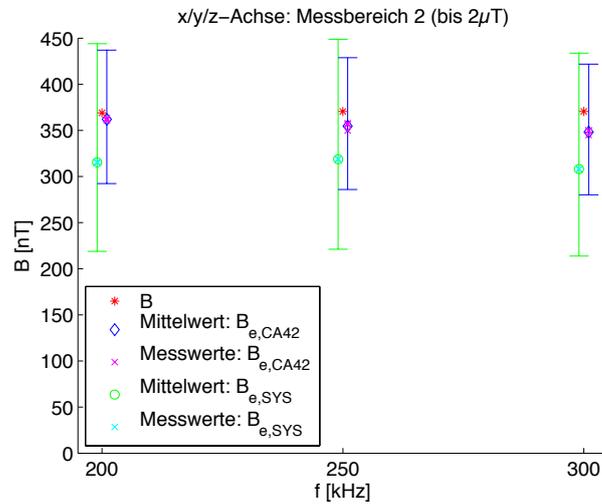


Abbildung 4.8: Kontinuierliche Messung bei "x/y/z-Position" - Darstellung der Messwerte und Messunsicherheiten nach Tabelle 4.4

## 4.2 Messsystem

Das entwickelte Messsystem eignet sich zur Spektralanalyse magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100kHz bis 400kHz. Es besteht aus dem Feldstärkemessgerät *C.A 42*, der zugehörigen Magnetfeldsonde *MF400* und dem Spektrumanalysator *FSH 3*, die durch den Einsatz einer Hardware und einem Laptop mit installierter Software für die Ansteuerung zu einem System zusammengesetzt wurden (vgl. Abbildung 4.9). Für die Handhabung des Systems und weitere Informationen wird an dieser Stelle auf die im Anhang befindliche Gebrauchsanweisung verwiesen (vgl. Seite 91).



Abbildung 4.9: Abbildung des Messsystems

Aufgrund der Beschaffenheit des Messsystems kommt es zu den folgenden Einschränkungen die in Abschnitt 5 diskutiert werden:

- Ein zusätzlicher *Impedanzwandler* wird benötigt um das Spannungssignal der Magnetfeldsonde nicht zu belasten. Wird auf diesen Wandler verzichtet, hat das eine Verfälschung der Messergebnisse zur Folge (vgl. Abschnitt 5.2).
- Aufgrund der Beschaffenheit des verwendeten Schalters *SEM133T* kommt es für die nicht durchgeschalteten Kanäle zu einer *falschen Messwertanzeige am Feldstärkemessgerät* (vgl. Abschnitt 5.3).
- Der verwendete Spektrumanalysators kann einen *Pegelfehler in der Anzeige im Bereich von 1,5dB* aufweisen. Diese Eigenschaft hat eine große Auswirkung auf die sich ergebende Messunsicherheit des Systems (vgl. Abschnitt 5.4).

# 5 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Testmessung sowie die Eigenschaften des Messsystems diskutiert und weiterführende Überlegungen angestellt.

## 5.1 Ergebnisse der Testmessung

Die Ergebnisse der Testmessungen in Abschnitt 4.1 zeigen, dass mit dem Messsystem die Messung von Spektren magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100kHz bis 400kHz möglich ist. Durch den Fehler in der Pegelanzeige des Spektrumanalysators *FSH 3* (im Bereich von 1,5 dB) wird die Messunsicherheit des Gesamtsystems entscheidend beeinträchtigt (vgl. Abschnitt 5.4). Durch die Wahl eines anderen Spektrumanalysators, der einen geringeren Pegelfehler aufweist, kann eine Verbesserung erreicht werden.

Weiters muss beachtet werden, dass die Korrekturfaktoren der Magnetfeldsonde eine gewissen Unsicherheit aufweisen. Diese kommt zu Stande, da das erzeugte magnetische Feld bei der Kalibrierung eine Unsicherheit von  $\pm 15\%$  aufgewiesen hat (vgl. Abschnitt 3.1.2). Durch ein genaueres Kalibrierungsverfahren kann diese Unsicherheit minimiert werden.

## 5.2 Impedanzwandler

Am Analogausgang des Feldstärkemessgeräts kann bei angeschlossener Magnetfeldsonde das dreikanalige-Sondensignal abgegriffen werden. Wie sich herausstellte, wurden vom Hersteller keine Sicherheitsvorkehrungen getroffen um eine mögliche Beeinflussung dieses Signals, das einen direkten Einfluss auf den am Messgerät angezeigten Messwert hat,

zu verhindern. Bei direktem Anschluss des Spektrumanalysators kommt es durch dessen  $50\Omega$ -Eingangswiderstand zu einer Belastung der Quelle und die am Analogausgang abgegriffene Spannung bricht ein.

Um eine erfolgreiche Messung durchführen zu können, musste der Messaufbau um eine Komponente erweitert werden. Es war erforderlich zwischen den Ausgang der Hardware und den Eingang des Spektrumanalysators einen Impedanzwandler einzubauen um den Analogausgang nicht zu belasten. Bei diesem Bauteil handelt es sich um einen Operationsverstärker in Spannungsfolgerschaltung (vgl. Abbildung 5.1).

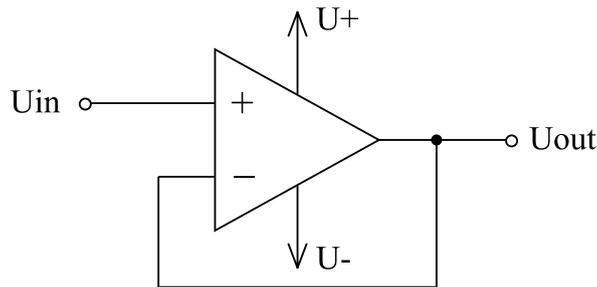


Abbildung 5.1: Operationsverstärker in Spannungsfolgerschaltung

Diese Schaltung zeichnet sich vor allem durch ihren hohen Eingangs- und durch den gleichzeitig niedrigen Ausgangswiderstand aus. Sie weist eine Verstärkung von eins auf ( $U_{in} = U_{out}$ ) und eignet sich somit ideal um das am Eingang anliegende Signal nicht zu belasten und am Ausgang eine höher belastbare Spannung zu erzeugen. Dafür benötigt das Bauteil zwei Spannungsversorgungen ( $U_+$ ,  $U_-$ ) um sowohl in den positiven als auch in den negativen Bereich aussteuern zu können.

### 5.3 Anzeige des Feldstärkemessgeräts C.A 42

Normalerweise werden die Signale der Magnetfeldsonde dem Feldstärkemessgerät zugeführt. An den Eingängen des CA 42 werden die Signale durch Analog-Digital-Wandler abgetastet und anschließend im Messgerät weiterverarbeitet.

Ist das Messsystem angeschlossen, kommt es zu einer falschen Messwertanzeige am Feldstärkemessgerät C.A 42. Dazu kommt es durch die Beschaffenheit des verwendeten Schalters, die zu der in Abbildung 5.2 dargestellten Situation führt.

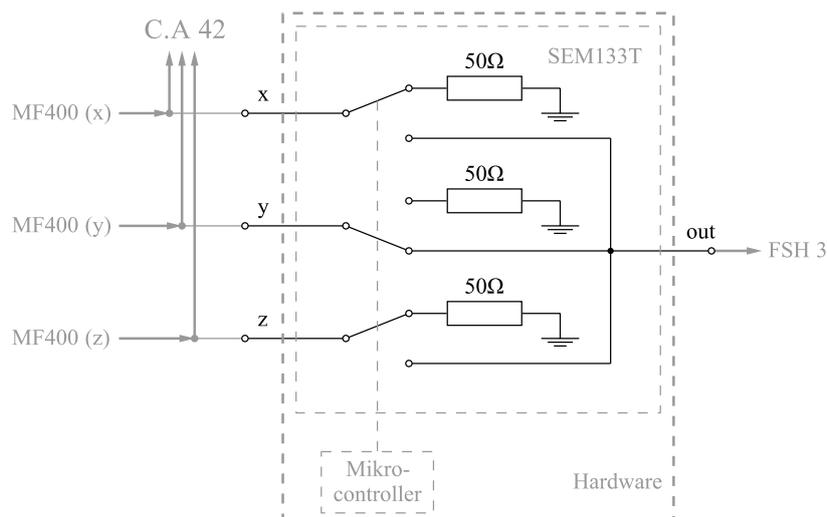


Abbildung 5.2: Anschluss des Analogausgangs des *C.A 42* an den Schalter *SEM133T*

Die von der Magnetfeldsonde erfassten Signale werden am Analogausgang des Feldstärkemessgeräts abgegriffen und dem in der Hardware befindlichen Schalter *SEM133T* zugeführt. Durch den Mikrocontroller findet im Schalter eine Kanalauswahl statt. Im dargestellten Fall (vgl. Abbildung 5.2) wird Kanal *y* an den Spektrumanalysator (über einen Impedanzwandler) durchgeschaltet und die anderen beiden Kanäle (*x*, *z*) werden im inneren des Schalters über einen  $50\Omega$ -Widerstand auf Masse gelegt.

Durch den niederohmigen Abschluss kommt es wie in Abschnitt 5.2 beschrieben zu einer Belastung der Quelle und die am Analogausgang abgegriffene Spannung bricht ein. Das hat natürlich auch einen Einfluss auf die vom Feldstärkemessgerät gemessene Spannung, was zu einer falschen Anzeige der Messwerte am *C.A 42* für die Achsen *x* und *z* führt.

Nur der durchgeschaltete Kanal, dessen Signal durch den hohen Eingangswiderstand des Impedanzwandlers entkoppelt wird, ist davon nicht betroffen. Die Anzeige des *C.A 42* ist daher bei Verwendung des Messsystems nur für den aktuell gemessenen Kanal (Kanal *y*, vgl. Abbildung 5.2) richtig und es ergibt sich daher kein Einfluss auf die Funktionsweise des entwickelten Systems.

Dieses Problem kann durch die Verwendung eines anderen Schalters gelöst werden. Der Schalter *SEM133* [4] der gleichen Serie ist ohne die erwähnten Abschlusswiderstände ausgeführt und dadurch würde keine Beeinflussung der Signale stattfinden. Dieser Schalter weist jedoch andere Abmessungen auf, wodurch ein neues Gehäuse für die Hardware gefertigt werden muss.

Eine weitere Möglichkeit wäre eine dreikanal-Spannungsfolgerstufe an den Analogausgang des Feldstärkemessgeräts anzuschließen. Durch den hohen Eingangswiderstand dieser Schaltung erfolgt praktisch keine Belastung der Quelle. Somit bleibt die vom *CA 42* gemessene Spannung unbeeinflusst. Die Ausgangsspannung entspricht der Spannung am Eingang und durch den geringen Ausgangswiderstand weist sie eine wesentlich höhere Belastbarkeit auf. Bei dieser Variante kann auf den Spannungsfolger am Ausgang der Hardware verzichtet werden.

### 5.4 Pegelfehler des Spektrumanalysators *FSH 3*

Der in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Fehler in der Pegelanzeige des gemessenen Spektrums trägt zur Unsicherheit des Messergebnisses bei. Für den Frequenzbereich unter 1MHz wird vom Hersteller kein Pegelfehler spezifiziert, er liegt jedoch laut Erfahrungswerten im Bereich von  $\pm 1,5\text{dB}$ .

Bei wiederholten Messungen lieferte die Pegelanzeige des Spektrumanalysators immer einen zu geringen Messwert. Es wurde versucht eine Korrekturkurve für die auftretende Messunsicherheit zu erstellen. Dabei wurde der Pegelfehler, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, für mehrere Frequenzpunkte bestimmt. Zur Kontrolle wurden die Messungen mehrfach durchgeführt. Die erhaltenen Faktoren sind jedoch nicht konstant und somit war es nicht möglich eine Pegelkorrekturkurve für das Messgerät zu erstellen.

### 5.5 Weitere Verbesserungsvorschläge

#### Verkürzung der Messdauer des Systems

Die Erfassung kontinuierlich auftretender magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100kHz bis 400kHz erfolgt problemlos. Kurzzeitig auftretende Felder, deren Verweildauer kürzer ist als die benötigte Zeit um die Spektren der drei Kanäle zu messen, können nicht oder nicht vollständig erfasst werden. Daher ist eine kürzestmögliche Messdauer von Interesse. Diese setzt sich nach Abbildung 3.32 aus der Umschaltdauer, der Verzögerungszeit (Sweepzeit) und aus den benötigten Zeiten für die Datenübertragung und Verarbeitung zusammen. (vgl. Abschnitt 3.5.1) Wie gefordert führt die Software kontinuierliche Berechnungen durch und gibt schon während des Messvorgangs die gemessenen

Spektren sowie das für die magnetische Ersatzflussdichte berechnete Spektrum am Bildschirm aus. Um die Messdauer einer einzelnen Achsen etwas verkürzen zu können, könnte sich die Software darauf beschränken die Daten einzulesen und erst nach Abschluss der Messungen die Berechnungen und Darstellungen durchzuführen.

### Hardwareverbesserungen

Der für die Durchführung einer Messung benötigte Impedanzwandler (vgl. Abschnitt 5.2) könnte zusätzlich in die Hardware integriert werden. Die Spannungsversorgung kann dabei über eine USB-Schnittstelle mit einem geeigneten DC-DC-Wandler erfolgen. Möglicherweise muss die Hardware dafür als *USB High Power Device* [5] deklariert werden und der benötigte Strom der Schaltung in den Einstellungen des EEPROMs erhöht werden.

Weiters wäre es möglich, die Mobilität des Messsystems zu erhöhen. Das Feldstärkemessgerät *CA 42* sowie der Spektrumanalysator *FSH 3* und der erforderliche Laptop können im Akkubetrieb arbeiten. Einzig die Hardware benötigt eine 28V-Spannungsversorgung. Um bei einer Messung standortunabhängig zu sein, sollten an dieser Stelle Verbesserungen vorgenommen werden. Beim verwendeten mechanischen Schalter *SEM133T* ergibt sich ein zu großer Leistungsbedarf wodurch der Betrieb über die USB-Schnittstelle nicht möglich war. Durch die Wahl eines Schalters mit einem geringeren Leistungsbedarf kann dieses Problem gelöst werden. Da mechanische Komponenten im Allgemeinen Abnutzungserscheinungen aufweisen und daher nur eine begrenzte Lebensdauer haben, sollte bevorzugt ein elektronischer Schalter eingesetzt werden. Dieser Schalter soll das anliegende Signal nicht beeinflussen und Frequenzen bis 400kHz problemlos übertragen.

## 6 Zusammenfassung

Das Feldstärkemessgerät *C.A 42* eignet sich für die Messung elektrischer und magnetischer Felder im Frequenzbereich von 10 Hz bis 400 kHz. Es erlaubt eine Spektralanalyse dieser Felder bis Frequenzen von 91 kHz. Mit Hilfe des entwickelten Messsystems kann die Spektralanalyse magnetischer Felder auf den Frequenzbereich von 100 bis 400 kHz erweitert werden. Die Grundbestandteile des Systems sind das Feldstärkemessgerät *C.A 42*, die zugehörige Magnetfeldsonde *MF400* und der Spektrumanalysator *FSH 3* die durch den Einsatz der entwickelten Hard- und Software zu einem Messsystem kombiniert wurden.

Die entwickelte Hardware ist das physikalische Bindeglied zwischen den beiden Messgeräten. Die Magnetfeldsonde *MF400* misst die magnetische Flussdichte in den drei orthogonalen Raumrichtungen. Über den Analogausgang des Feldstärkemessgeräts kann das dreikanalige Signal der Sonde abgegriffen werden und wird der Hardware, die eine Art Multiplexer darstellt, zugeführt. Der Ausgang der Hardware muss über einen Impedanzwandler mit dem einkanaligen Eingang des Spektrumanalysators verbunden werden. Die Messungen der einzelnen Kanäle wird über die Software gesteuert und erfolgt zeitversetzt.

Nach der Messung des Spektrums eines Kanals erfolgt per Software eine Vorverarbeitung, bei der die Kalibrierungsfaktoren der Messsonde *MF400* miteinbezogen werden. Sobald die Spektren der drei Kanäle erfasst wurden, wird aus den orthogonalen Feldkomponenten das resultierende Spektrum, der magnetischen Ersatzflussdichte, berechnet.

Mit Hilfe des Messsystems können Einzelmessungen durchgeführt werden, bei dem jede Achse einmal gemessen wird. Es ist aber auch möglich, diesen Vorgang über eine einstellbare Messdauer in einem einstellbaren Intervall zu wiederholen und die gemittelten Ergebnisse grafisch darzustellen. Weiters können die Ergebnisse mit Referenzwerten [16] [7] verglichen werden, eventuelle Überschreitungen werden gekennzeichnet und eine Abspeicherung der Daten aus Messung und Berechnung ist möglich.

Die Ergebnisse der Testmessungen zeigen, dass mit dem erstellten System prinzipiell die Messung von Spektren magnetischer Felder möglich ist. Kurzzeitig auftretende Felder, deren Verweildauer kürzer ist als die benötigte Zeit um die Spektren der drei Kanäle zu messen, können nicht oder nicht vollständig erfasst werden. Durch den Fehler in der Pegelanzeige des Spektrumanalysators *FSH 3* (im Bereich von 1,5 dB) wird die Messunsicherheit des Gesamtsystems entscheidend beeinträchtigt. Auch die bei der Kalibrierung ermittelten Korrekturfaktoren weisen eine Unsicherheit von  $\pm 15\%$  auf und erhöhen somit die Messunsicherheit.

# Literaturverzeichnis

- [1] Mikrocontroller.net: *Atmel AVR-Tutorial*. Website. <http://www.mikrocontroller.net/>, Abruf: 2010-03-14
- [2] Future Technology Devices International Ltd.: *MProg 3.0 Manual*. Manual. <http://www.ftdichip.com>, Abruf: 2009-07-14
- [3] National Instruments: *NI VISA*. Website. <http://www.ni.com/visa/>, Abruf: 2010-03-21
- [4] Narda: *Stocked Electro-Mechanical Switches SEM133T*. Datenblatt. <http://www.nardamicrowave.com/east/index.php?m=Products&e=section&sectionId=11>, Abruf: 2010-03-14
- [5] USB Implementers Forum: *USB Info: Frequently Asked Questions*. Website. <http://www.usb.org/about/faq/ans3>, Abruf: 2010-03-21
- [6] Chauvin Arnoux Group: *User's manual C.A 42 Fieldmeter*. Bedienungsanleitung, Juni 2005
- [7] OVE: *VORNORM ÖVE/ÖNORM E 8850 Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz - Beschränkung der Exposition von Personen*. Februar 2006
- [8] Mean Well: *28V Steckernetzteil (ES18B28-P1J)*. Datenblatt. <http://www.mean-well.com>. Version: März 2007, Abruf: 2010-04-06
- [9] The MathWorks Inc.: *Matlab Product Help*. R2007b. August 2007
- [10] Pollin Electronic GmbH: *Atmel Evaluations-Board Version 2.0.1*. Gebrauchsanleitung, Dezember 2008

- [11] Future Technology Devices International Ltd: *UM232R USB - Serial UART Development Module*. Datenblatt. <http://www.ftdichip.com>. Version: Juli 2008, Abruf: 2009-07-14
- [12] Atmel: *8-bit AVR Instruction Set*. Datenblatt. <http://www.atmel.com>. Version: Juli 2009, Abruf: 2009-07-14
- [13] Atmel: *Atmel ATmega8*. Datenblatt. <http://www.atmel.com>. Version: Mai 2009, Abruf: 2009-07-14
- [14] Österreichischer Kalibrierdienst: *Kalibrierschein der Magnetfeldsonde MF400 des Feldstärkemessgeräts C.A42*. Mai 2009
- [15] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: *rsfsh VXI Plug&Play instrument driver help*. Jänner 2009
- [16] ICNIRP-Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). In: *Health Physics* 74 (1998), Nr. 4, S. 494–522
- [17] RAUSCHER, C. ; JANSEN, V. ; MINIHOLD, R. : *Grundlagen der Spektralanalyse*. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2000. – 19–32 S.
- [18] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: *Bedienhandbuch Handheld Spectrum Analyzer R&S FSH*. Bedienhandbuch, November 2006

# Anhang

**Institut für Health Care Engineering**

Kopernikugasse 24/I, A-8010 Graz

---

**Gebrauchsanweisung**

**Messsystem**

**AchsenSwitch-CA42**

Graz, Juni 2010

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Komponenten</b>	<b>2</b>
2.1	Hardware ( <i>AchsenSwitch-CA42</i> ) . . . . .	3
2.1.1	Anschlüsse . . . . .	3
2.2	Software . . . . .	4
2.2.1	Mindestanforderungen an den PC . . . . .	4
2.2.2	Installation . . . . .	4
2.2.3	Berechnungsmethoden . . . . .	5
2.2.4	Korrekturfaktoren . . . . .	6
2.2.5	Referenzwerte . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Betrieb</b>	<b>9</b>
3.1	Vorbereitung . . . . .	9
3.2	Verbindungsaufbau . . . . .	11
3.3	Einstellungen . . . . .	12
3.3.1	Messung . . . . .	12
3.3.2	Export . . . . .	14
3.3.3	<i>CA 42</i> . . . . .	17
3.3.4	<i>R&amp;S FSH 3</i> . . . . .	18
3.3.5	Hardware <i>AchsenSwitch-CA42</i> . . . . .	18
3.3.6	<i>Figure</i> -Panel . . . . .	19
3.4	Durchführen einer Messung . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Technische Daten</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Zubehör</b>	<b>23</b>

# 1 Einleitung

*Allgemeine Hinweise zur Bedienung des Geräts und dem bestimmungsgemäßen Gebrauch*

Dieses Messsystem ist eine Erweiterung für das Feldstärkemessgerät *C.A 42* bei Verwendung des Magnetfeldsonde *MF400*.

Das *C.A 42* selbst lässt eine Spektralanalyse nur bis Frequenzen von 91 kHz zu, obwohl die Messsonde *MF400* bis 400 kHz kalibrierbar ist. Das Messsystem nutzt den Analogausgang des Feldstärkemessgeräts um eine Spektralanalyse magnetischer Felder im Frequenzbereich von 100 kHz bis 400 kHz durchzuführen.

Die Messung der drei orthogonalen Feldkomponenten erfolgt dabei zeitversetzt und wird über die Hardware gesteuert. Nach dem Messvorgang wird die resultierende Feldverteilung per Software berechnet. Das Messsystem (vgl. Abbildung 1.1) besteht neben dem Feldstärkemessgerät (*C.A 42*, *MF400*) aus einer Hardwarekomponente (*AchsenSwitch-CA42*), einer Softwarekomponente und dem Spektrumanalysator *FSH 3*. Neben dem erforderlichen PC wird für die Messung ein Impedanzwandler am Ausgang der Hardware benötigt, der nicht enthalten ist.



SW ... Software HW ... Hardware \*) Der benötigte Impedanzwandler ist nicht inkludiert!

Abbildung 1.1: Messsystem

## 2 Komponenten

Für den Betrieb des Messsystems sind die folgenden Komponenten erforderlich:

- Feldstärkemessgerät *CA 42*<sup>1</sup> inklusive der Magnetfeldsonde *MF400*
  - Software-Version: 1.12
  - Für die Handhabung des Geräts wird an dieser Stelle an die Bedienungsanleitung des Feldstärkemessgeräts verwiesen.
- Spektrumanalysator *Rohde&Schwarz FSH 3*<sup>2</sup>
  - Software-Version: 13.1
  - Für die Handhabung des Geräts wird an dieser Stelle an das Bedienhandbuch des Spektrumanalysators verwiesen.
- Hardware *AchsenSwitch-CA42* (enthalten)
  - Benötigte Messleitungen bzw. Zubehör (vgl. Abschnitt 5)
- *Impedanzwandlerstufe* am Eingang des *FSH 3* (=Ausgang der Hardware)
- PC
  - Mindestsystemanforderungen: Siehe Abschnitt 2.2.1
  - Installation der benötigten Driver und der Steuerungssoftware (siehe Abschnitt 2.2.2)

---

<sup>1</sup>Groupe Chauvin Arnoux, Paris , Frankreich - <http://www.chauvin-arnoux.com>

<sup>2</sup>Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München, Deutschland - <http://www.rohde-schwarz.com>

2 Komponenten

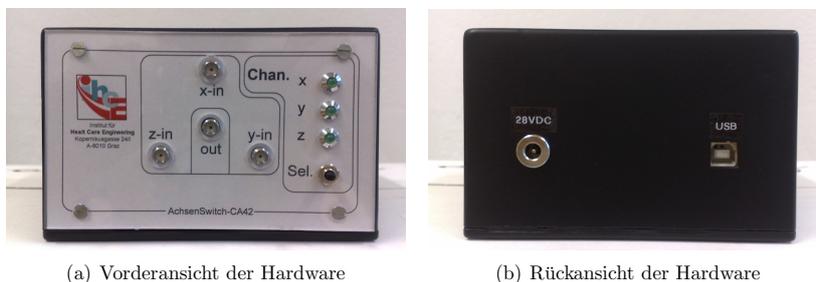
## 2.1 Hardware (AchsenSwitch-CA42)

Der *AchsenSwitch-CA42* stellt das Bindeglied zwischen dem dreikanaligen Analogausgang des Feldstärkemessgeräts *CA 42* und dem einkanaligen Eingang des Spektrumanalysators *FSH 3* dar.

Neben den Anschlüssen an der Vorderseite besitzt das Gerät eine LED-Anzeige ( $x,y,z$ ), die den aktuell betriebsbereiten Kanal anzeigt (vgl. Abbildung 2.1(a)). Üblicherweise erfolgt die Kanalweitschaltung im Betrieb über die Software, jedoch kann über den *Select*-Taster (*Sel.*) auch eine manuelle Kanalauswahl erfolgen.

### 2.1.1 Anschlüsse

An der Vorderseite besitzt das Gerät vier SMA-Buchsen (vgl. Abbildung 2.1(a)). Der Analogausgang des Feldstärkemessgeräts *CA 42* kann über die *in*-Anschlüsse ( $x$ -in,  $y$ -in,  $z$ -in) mit der Hardware verbunden werden. Die *out*-Buchse liefert das ausgewählte Signal für den Spektrumanalysator *FSH 3*. Der Anschluss erfolgt über vier SMA-BNC-Adapter.



(a) Vorderansicht der Hardware

(b) Rückansicht der Hardware

Abbildung 2.1: Vorder- und Rückansicht der Hardware

An der Rückseite besitzt das Gerät zwei Anschlüsse (vgl. Abbildung 2.1(b)). Über die USB-Buchse vom Typ B (rechts) kann die Hardware über den PC angesteuert werden.

Die Spannungsversorgung des Geräts mit 28 V erfolgt über eine 2,1mm-Einbaubuchse durch das Steckernetzteil *MeanWell ES18B28-P1J*. Sie darf ausschließlich mit einem Steckernetzteil von diesem Typ erfolgen.

2 Komponenten

## 2.2 Software

Die Software übernimmt die Steuerung des Messvorgangs. Dafür ist eine funktionierende Kommunikation mit den beteiligten Geräten (*C.A 42*, *FSH 3*, Hardware) erforderlich.

### 2.2.1 Mindestanforderungen an den PC

- **Prozessor:** *Intel Pentium 4 2810MHz*
- **Arbeitsspeicher:** 2048MB RAM
- **Schnittstellen:** 2 x RS232<sup>3</sup> / 1x USB
- **Betriebssystem:** *Windows XP*<sup>4</sup>
- **Vorinstallierte Software:** *Matlab*<sup>5</sup> *Version 7.5.0.342 (R2007b)* inkl. *Instrument Control Toolbox*

### 2.2.2 Installation

Für die einwandfreie Funktion der Software muss die Installation der folgenden Komponenten, die auf der beiliegenden CD (im Ordner *Software*) enthalten sind, erfolgen:

1. *rsfsh\_vxipnp\_2\_0.exe*
  - Um eine Kommunikation mit dem Spektrumanalysator *FSH 3* zu erstellen, ist die Installation des *VXIpluginInstrument Driver* der Firma *Rohde&Schwarz* erforderlich. Eine aktuelle Version kann von der Website des Herstellers (<http://www.rohde-schwarz.com>) heruntergeladen werden.
2. Der *VXIpluginInstrument Driver* der Firma *Rohde&Schwarz* setzt die Installation der **VISA Run-Time Engine** der Firma *National Instruments* voraus, die nach Registrierung von der Website des Herstellers (<http://www.ni.com>) heruntergeladen werden kann.

<sup>3</sup>Anstelle der RS232-Schnittstelle kann auch ein USB/Serial-Adapter zum Einsatz kommen.

<sup>4</sup>Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA - <http://www.microsoft.com>

<sup>5</sup>The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA - <http://www.mathworks.com>

2 Komponenten

3. *CDM 2.04.16.exe*

- Dieser Driver ermöglicht die Kommunikation mit dem USB/UART-Chip des *AchseSwitch-CA42* über die USB-Schnittstelle. Eine aktuelle Version kann von der Website des Chipherstellers (<http://www.ftdichip.com>) heruntergeladen werden.

4. *Steuerungssoftware*

- Die Steuerungssoftware, die sich im Unterordner „*Software\AchsenSwitchCA42*“ befindet, muss auf die Festplatte des PC kopiert werden.

### 2.2.3 Berechnungsmethoden

Die Software übernimmt neben der Steuerung des Messvorgangs auch die Weiterverarbeitung und Darstellung der gemessenen Spektren.

Die drei aus den Spannungssignalen der Magnetfeldsonde *MF400* ermittelten Spektren werden zunächst in die magnetischen Flussdichten umgerechnet und anschließend mit den folgenden Berechnungsmethoden weiterverarbeitet:

Die Umrechnung der gemessenen Spektren erfolgt jeweils punktweise.

Die magnetischen Ersatzflussdichte  $B_e$  kann über die drei orthogonalen Komponenten der magnetischen Flussdichte ( $B_x, B_y, B_z$ ) nach (2.1) bestimmt werden.

$$B_e = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (2.1)$$

Erfolgt eine kontinuierliche Messung, so werden die einzelnen magnetischen Flussdichten  $B_i$  über die Anzahl der Messungen  $n$  gemittelt. Die Berechnung der gemittelten magnetischen Flussdichte  $\bar{B}$  erfolgt nach (2.2).

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \quad (2.2)$$

2 Komponenten

**2.2.4 Korrekturfaktoren**

Die Magnetfeldsonde *MF400* ist für eine Messung bis 400 kHz kalibrierbar. Die Software beinhaltet eine Funktion um die Kalibrierung nach (2.3) zu berücksichtigen.

$$\text{instrument reading} \times \text{linear correction factor} = \text{actual (T)} \quad (2.3)$$

Der angezeigte Wert (*instrument reading*) muss mit einem im Kalibrierschein angegebenen Korrekturfaktor (*linear correction factor*) multipliziert werden um eine korrigierte Anzeige (*actual (T)*) zu erhalten.

Für die Berücksichtigung der Korrekturfaktoren besitzt die Software zwei Funktionen, die im Unterordner *functions* der Steuerungssoftware zu finden sind.

Die Funktion *getCF.m* beinhaltet die Korrekturfaktoren der unterschiedlichen Frequenzen. In der Datei stehen für die einzelnen Messbereiche Matrizen mit zwei Spalten zur Verfügung von denen die erste die Frequenz und die zweite die zugehörigen Korrekturfaktoren enthält (vgl. Abbildung 2.2). Diese Matrizen können nach dem angegebenen Schema erweitert und verändert werden um neue Kalibrierungsfaktoren einzutragen.

```

%% (2) Measurement Scale 2µT
% Correction Factors at 1.26µT (2µT)
% cf = [[<Z>] [<CF>]]
cf2 = [10e3  1.04547694945722
20e3  1.03955896714174
30e3  1.03886863176314
40e3  1.04096497959613
50e3  1.03328205591051
60e3  1.03821225482624
70e3  1.03274419980002
80e3  1.02944642974047
90e3  1.0297152052439
100e3  1.03108041779395
150e3  1.05633835348363
200e3  1.09822119151971
250e3  1.14911377980381
300e3  1.22351359812875
350e3  1.33877668478353
400e3  1.48188131360632];
    
```

Abbildung 2.2: Anpassung der Korrekturfaktoren

Insgesamt beinhaltet die Datei sechs solcher Matrizen. Für jeden Messbereich der Magnetfeldsonde *MF400* ist eine vorgesehen. Bei durchgeführter Kalibrierung der sechs Messbereiche können die Kalibrierungsfaktoren entsprechend eingetragen werden.

Die Funktion *implyCF.m* berechnet die korrigierten Werte nach (2.3).

## 2 Komponenten

## 2.2.5 Referenzwerte

Über die Software besteht die Möglichkeit einen Vergleich mit Referenzwerten eines Bewertungsstandards durchzuführen. Standardmäßig sind die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und für beruflich exponierte Personen der *ICNIRP-Guidelines* implementiert. Diese können in der Datei *init.m* im *functions*-Ordner der Steuerungssoftware nach dem angegebenen Schema beliebig erweitert werden.

Im Abschnitt *\*\*\* Reference Levels \*\*\** der Datei *init.m* folgt nach einer kurzen Arbeitsanweisung der folgende Codeabschnitt (vgl. Abbildung 2.3).

```

% Currently Included: ICNIRP general public (Line 1,2)
%                   ICNIRP occupational (Line 3,4)
ReferenceLevel = ...
    0 1      8      25      800      3e3      150e3
    '0' '4e4*f^1e-6' '4e4/f^2*f^1e-6' '5e3/f*f^1e-6' '5e3/f*f^1e-6' '6.25*f^1e-6' '6.25*f^1e-6
    0 1      8      25      820      65e3      1e6
    '0' '2e5*f^1e-6' '2e5/f^2*f^1e-6' '2.5e4/f*f^1e-6' '25e3/f*f^1e-6' '30.7*f^1e-6' '2e6/f*f^1e-6

%% Names, Colors and Linestyles used in the Plots ( Legend)
% Names
name_Spect = 'Spectrum'; % Name of the Spectrum
name_Ref = ('ICNIRP General Public'; 'ICNIRP Occupational'); % Name of the Reference Levels
name_Excd = ('ICNIRP Gen.Pub. (exceeded)'; 'ICNIRP Occu. (exceeded)'); % Name for the exceeded values

% Colors/Linestyles
color_Spect = ('b-'; 'g-'); % Line 1: 301 Samples / Line 1&2: 602 Samples
color_Ref = ('c--'; 'm--'); % Color of the Reference Levels
color_Excd = ('c*'; 'm*'); % Color for marking the exceeded values

```

Abbildung 2.3: Hinzufügen von Referenzwerten

Prinzipiell besteht die Definition eines Referenzwertes aus zwei Codezeilen. In der ersten Zeile erfolgt die Angabe der Frequenz und in der zweiten wird der zugehörige Wert der magnetischen Flussdichte, unter Anführungszeichen, spezifiziert. Weist die magnetische Flussdichte eine Frequenzabhängigkeit auf, so kann zusätzlich die Variable  $f$  zur Definition hinzugefügt werden.

Ist die hinzugefügte Definition eines Referenzwertes kürzer als die bereits vorhandenen Referenzwerte, so müssen die restlichen Elemente der Matrix mit *NaN* für die Frequenz bzw. *'NaN'* für den Wert der magnetischen Flussdichte aufgefüllt werden um die Struktur der Matrix aufrecht zu erhalten. Ist die Definition länger, so müssen die bereits vorhandenen Referenzwerte um *NaN* bzw. *'NaN'* ergänzt werden.

In den folgenden Zeilen muss die Bezeichnung der Referenzwerte in der Legende (*name\_Ref*) und die entsprechende Liniendarstellung (*color\_Ref*) spezifiziert werden. Für die Kennzeichnung der Referenzwertüberschreitungen werden entsprechend *name\_Excd*

*2 Komponenten*

und *color\_Excel* herangezogen. Die *Cell-Arrays* sind entsprechend der hinzugefügten Referenzwerte zu erweitern. Die Liniendarstellung erfolgt entsprechend der für den *Matlab*-Befehl *plot* spezifizierten Schreibweise.

## 3 Betrieb

### 3.1 Vorbereitung

Nach der Installation der Software kann die Inbetriebnahme des Messsystems erfolgen. Zunächst müssen die beteiligten Komponenten richtig miteinander verbunden werden. Für die Handhabung des Feldstärkemessgeräts *C.A 42* und des Spektrumanalysators *FSH 3* wird auf die entsprechenden Gebrauchsanweisungen verwiesen.

Das Messsystem ist entsprechend Abbildung 3.1 aufzubauen. An das Feldstärkemessgerät *C.A 42* wird die Magnetfeldsonde *MF400* sowie der Adapter zum Auslesen des Analogausgangs angeschlossen. Die Eingänge der Hardware (*x-in*, *y-in*, *z-in*) werden über SMA-Adapter und BNC-Kabel mit dem dreikanaligen Analogausgang des *C.A 42* verbunden. Der Ausgang der Hardware (*out*) muss über einen Impedanzwandler (nicht enthalten) an den HF-Eingang des *FSH 3* angeschlossen werden. Dieser verhindert eine Belastung der Quelle durch den Eingangswiderstand des Spektrumanalysators was zu einem Spannungseinbruch am Analogausgang des *C.A 42* führen würde. Die Verbindung erfolgt ebenfalls über ein BNC-Kabel.

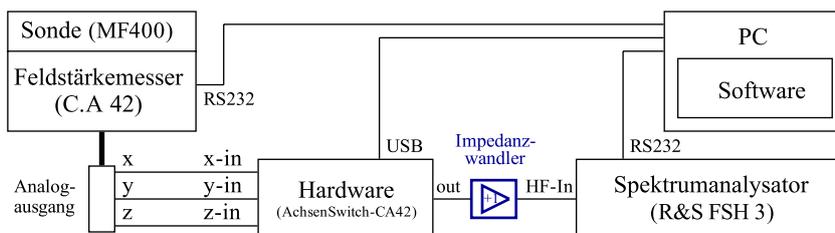


Abbildung 3.1: Aufbau des Messsystem

## 3 Betrieb

Um in weiterer Folge eine Messung durchführen zu können, müssen die Geräte an den PC angeschlossen werden. Die Verbindung des *C.A 42* und des *FSH 3* erfolgt über entsprechende Adapter für die serielle Schnittstelle. Die Hardware wird über ein USB-Kable an den PC angeschlossen. Die Spannungsversorgung der Hardware übernimmt das Steckernetzteil *MeanWell ES18B28-P1J*.

Um die Steuerungssoftware starten zu können, sollte nun der das Programm enthaltene Ordner als *Matlab*-Arbeitsverzeichnis gewählt werden. Durch den folgenden Aufruf erfolgt der Programmstart:

```
>> main
```

Nach dem Ladevorgang erscheint die in Abbildung 3.2 dargestellte Benutzeroberfläche am Bildschirm.

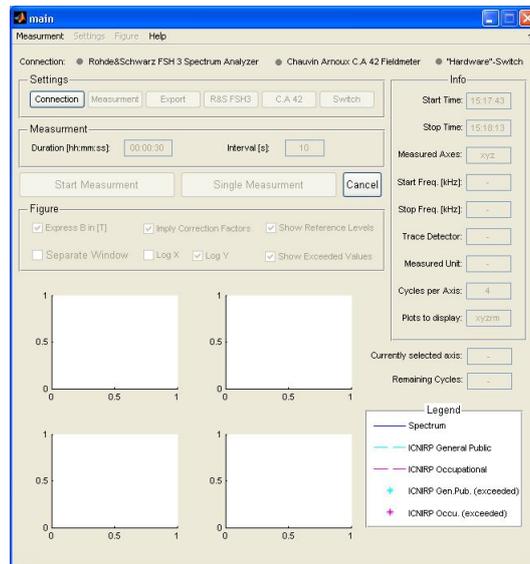


Abbildung 3.2: *Hauptoberfläche*

## 3.2 Verbindungsaufbau

Bis auf *Connection* sind zunächst alle Schaltflächen deaktiviert. Ohne eine funktionierende Kommunikation zu den beteiligten Geräten kann der Programmablauf nicht fortgeführt werden. Durch Aufruf des *Connection*-Menüs können nun die Einstellungen für den Verbindungsaufbau zu den einzelnen Komponenten erfolgen (vgl. Abbildung 3.3).

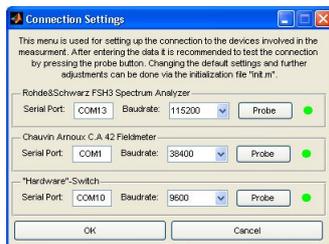


Abbildung 3.3: Kommunikationseinstellungen

Für jedes beteiligte Gerät kann nun das entsprechende COM-Port sowie die zu verwendende Baudrate ausgewählt werden. Der Hardware, die eigentlich über USB mit dem PC verbunden ist, wird durch den installierten Driver ein sogenanntes VCP (*Virtual COM Port*) zugewiesen.

In der Systemsteuerung (*Geräte-Manager*) des Betriebssystems kann festgestellt werden, welches Gerät an welchem COM-Port angeschlossen ist. Diese Information kann nun im entsprechenden Textfeld in der Benutzeroberfläche eingetragen werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Baudrateneinstellung. Die Hardware arbeitet standardmäßig mit 9600 Baud. Im Falle des *C.A 42* und des *FSH 3* muss diese Einstellung sowohl in der Software als auch am Gerät selbst durchgeführt werden. An den Messgeräten können diese Einstellungen in den folgenden Menüs durchgeführt werden:

- **C.A 42:** Menü -> Options -> System
- **FSH 3:** Setup -> General -> Serial Baud...

### 3.3 Einstellungen

Die restlichen Einstellungen können nach Programmstart und erfolgreichem Verbindungsaufbau über die einzelnen Untermenüs durchgeführt werden. Ein Aufruf dieser kann in der Hauptoberfläche (vgl. Abbildung 3.2) über das Menü *Settings* oder auch über die entsprechenden Schaltflächen im *Settings*-Panel erfolgen.

Um die Einstellungen nicht jedesmal nach Programmstart erneut durchführen zu müssen, können sie in der Datei *init.m* im *functions*-Ordner der Steuerungssoftware festgelegt werden. Die in dieser Datei enthaltenen Einstellungen werden beim Programmstart geladen.

#### 3.3.1 Messung

Im *Measurement*-Menü (vgl. Abbildung 3.4) können die Einstellungen, die den kontinuierliche Messvorgang betreffen, vorgenommen werden.

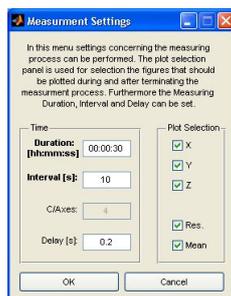


Abbildung 3.4: Messeinstellungen

Dabei kann die Gesamtmessdauer (*Duration*) und der Intervall (*Interval*) definiert werden. Diese Parameter können auch direkt in der Hauptoberfläche im *Measurement*-Panel eingestellt werden und sind wie folgt definiert (vgl. Abbildung 3.5):

- **Duration** ( $t_m$ ): Die Gesamtmessdauer ist die Zeitdauer von Beginn der ersten bis zu Beginn der letzten Messung.
- **Interval** ( $t_i$ ): Der Intervall beschreibt die Zeitdauer von Beginn einer Messung bis zum Beginn der nächsten Messung

3 Betrieb

Die Anzahl der durchzuführenden Messungen (*Number of measurements*) errechnet sich aus diesen beiden Parametern (vgl. Abbildung 3.5). Es wird eine Rundung der Gesamtmessdauer durchgeführt, sodass sich beim eingestellten Intervall eine ganze Zahl an Messdurchläufen ergibt.

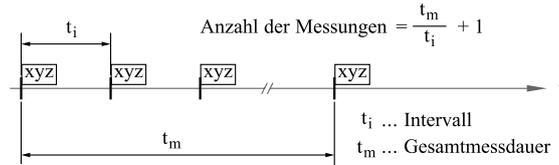


Abbildung 3.5: Gesamtmessdauer und Intervall

Die Eingabe der Gesamtmessdauer (*Duration*) kann dabei auf die folgende Art erfolgen:

<i>Duration</i>	hh:mm:ss	<i>Duration</i>	hh:mm:ss
2:4:10	→ 02:04:10	10s	→ 00:00:10
2:4	→ 02:04:00	2h:10s	→ 02:00:10
2	→ 02:00:00	4m10s	→ 00:04:10
2h	→ 02:00:00	2h4m	→ 02:04:00
4m	→ 00:04:00	2h4m10s	→ 01:02:03

Die einstellbare Verzögerungszeit (*Delay*) sollte nicht kürzer als die *Sweepzeit* des Spektrumanalysators *FSH 3* gewählt werden. Sie beschreibt jene Zeitdauer, die nach dem Umschaltvorgang des *AchsenSwitch-CA42* abgewartet wird, bevor das Spektrum von der Steuerungssoftware ausgelesen wird. In anderen Worten gesagt, es ist die Zeitdauer, die dem Spektrumanalysator zur Verfügung steht, um das Spektrum des anliegenden Signals zu bestimmen.

Über das *PlotSelection*-Panel kann ausgewählt werden, welche Diagramme während und nach dem Messvorgang ausgegeben werden sollen. Es ist möglich die Spektren der gemessenen Achsen ( $x, y, z$ ) direkt nach deren Erfassung am Bildschirm darzustellen. Nach einem Messdurchgang (Messung der drei Kanäle  $x, y, z$ ) wird die magnetische Ersatzflussdichte berechnet. Über die Checkbox (*Res.*) kann ihre grafische Ausgabe erfolgen. Die Checkbox (*Mean*) übernimmt die Darstellung des gemittelten Spektrums nach Abschluss des Messvorgangs. Um die Performance der Software zu erhöhen, kann je nach

## 3 Betrieb

Bedarf auf die Darstellung der Diagramme verzichtet werden. Ein Abspeicherung der Daten erfolgt im Hintergrund.

## 3.3.2 Export

Die Exporteinstellungen (*Export Settings*, vgl. Abbildung 3.6) werden über die *Export*-Schaltfläche aufgerufen und beschäftigen sich mit der Messdatensicherung. Die Abspeicherung der Ergebnisse erfolgt nach Abschluss aller Berechnungen am Ende des Messvorgangs. Die Rohdaten hingegen können auch kontinuierlich zwischen den einzelnen Messungen gesichert werden. Diese Vorgehensweise bewährt sich vor allem bei längeren Messvorgängen, da im Falle eines Fehlers, der den Ablauf unterbrechen würde, die Daten bis zu diesem Zeitpunkt gesichert werden.

Aus diesem Grund empfiehlt es sich diese Einstellungen schon vor Beginn des Messvorgangs durchzuführen. Über die Checkbox *Save data to file* und die zugehörige *Buffer*-Einstellung kann die generelle Abspeicherung und die Zwischenspeicherung der Rohdaten aktiviert werden. Eigentlich erfolgt die Abspeicherung auch wenn diese Option nicht aktiviert ist, jedoch werden die entsprechenden Dateien bei jedem neuen Messvorgang überschrieben.

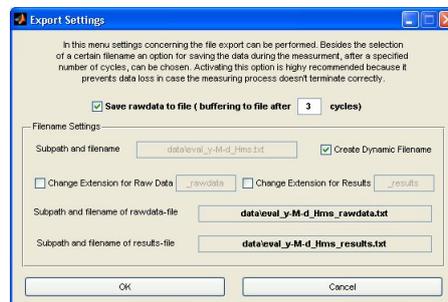


Abbildung 3.6: Exporteinstellungen

Prinzipiell erfolgt bei einem Messvorgang die Erstellung von zwei Dateien. Eine Datei enthält die Rohdaten und wird im Verlauf der Messung kontinuierlich erweitert. Die andere enthält die Ergebnisse und wird nach Ende des Messvorgangs, nach Abschluss der notwendigen Berechnungen, erstellt.

## 3 Betrieb

In den Exporteinstellungen wird zunächst ein Dateinamen gewählt (z.B. „messung1.txt“) der als Ausgangspunkt für den Namen der Rohdaten- und Ergebnis-Datei herangezogen wird. Dieser kann über das Textfeld *Subpath and filename* festgelegt werden. Der *subpath* beschreibt das zu wählende Unterverzeichnis im Ordner der Steuerungssoftware. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit über die Option *Create Dynamic Filename* einen dynamischen Dateinamen zu erzeugen. Das bedeutet, dass bei jedem Messvorgang ein Dateiname erzeugt wird, der das aktuell Datum sowie die Uhrzeit zu Messbeginn enthält.

Ohne weitere Einstellungen wird nun für die Rohdaten eine Datei mit der Erweiterung „\_rawdata“ (z.B. „messung1\_rawdata.txt“) und die für die Ergebnisse eine Datei mit der Erweiterung „\_results“ (z.B. „messung1\_results.txt“) erstellt. Diese Einstellungen sind über die Optionen *Change Extension for ...* anpassbar.

Eine Vorschau der gewählten Dateinamen, bestehend aus Grunddateiname und Erweiterung, wird im *FilenameSettings*-Panel dargestellt.

Nachfolgend wird der Aufbau der Dateien erklärt:

### **Aufbau der Rohdatendatei**

Die Rohdaten die sich aus den vom *FSH 3* gemessenen Spektren und aus den Datensätzen des *CA 42* zusammensetzen, werden gemeinsam mit einem Header in einer Datei gesichert. Die Abspeicherung erfolgt zeilenweise.

Der Header (vgl. Abbildung 3.7) beinhaltet allgemeine Daten zur Messung, sowie Informationen zum ausgelesenen Spektrum.

Der Datensatz des *CA 42* (vgl. Abbildung 3.8) der direkt vom Feldstärkemessgerät ausgelesen wurde, beinhaltet Informationen um das gemessene Spektrum in der richtigen Größenordnung darstellen zu können. Der Datensatz wird durch Komma getrennt abgespeichert.

Das vom Spektrumanalysator ausgelesene Spektrum besteht je nach *Detektor*-Einstellung aus 301 oder 602 Datenpunkten. Mit Hilfe der im Dateiheader enthaltenen Informationen lässt sich das Spektrum in einer bestimmten Einheit darstellen. Die einzelnen Messwerte werden ebenfalls durch Komma getrennt, abgespeichert.

3 Betrieb

[h01] , [h02] , [h03] , [h04] , [h05] , [h06] , [h07] , [h08] , [h09] , [h10]

- [h01] ... Startzeitpunkt der Messung (YYYY-MM-DD hh:mm:ss.f)
- [h02] ... Messdauer (0-0-0\* hh:mm:ss.f) \* ... nicht belegt
- [h03] ... Intervall (ss.f) [h07] ... StartFrequency (FSH 3)
- [h04] ... Verzögerungszeit (ss.f) [h08] ... StopFrequency (FSH 3)
- [h05] ... gemessene Achsen (String, z.B: 'xyz') [h09] ... TraceDetector (FSH 3)
- [h06] ... Messdurchläufe pro Achse [h10] ... AmplitudeLevelUnit (FSH 3)

Beispiel:

2010-02-05 13:19:59.378,0-0-0 0:0:30.000,10.000,0.200,xyz,4,100000.000,400000.000,4,6

Abbildung 3.7: Aufbau des Dateiheaders

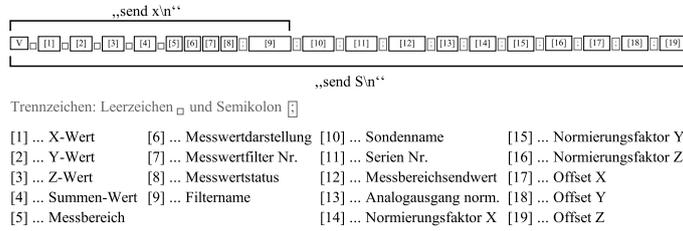


Abbildung 3.8: Aufbau des CA 42-Datensatzes

Der Aufbau der Rohdatendatei ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die erste Zeile der Datei ist der Header. Danach beinhaltet sie abwechselnd die Datensätze des CA 42 und die Spektren der gemessenen Kanäle. Wurde eine kontinuierliche Messung durchgeführt, so sind sie in mehrfacher Ausführung vorhanden:

Header; CA42-Data; Spektrum(Bx1); CA42-Data; Spektrum(By1);  
CA42-Data; Spektrum(Bz1); CA42-Data; Spektrum(Bx2), ...

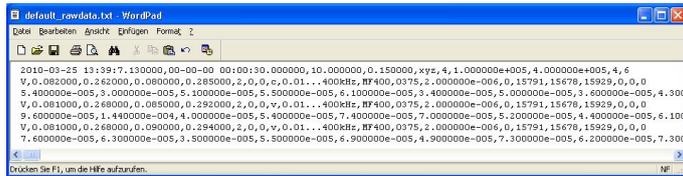


Abbildung 3.9: Aufbau der Rohdatendatei

3 Betrieb

**Aufbau der Ergebnisdatei**

Der Aufbau der Ergebnisdatei ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Im Gegensatz zur Rohdatendatei enthält sie nur die berechneten und korrigierten Spektren. Wurde eine kontinuierliche Messung durchgeführt, so enthält die Datei die gemittelten Werte:

Spektrum (Bx) ; Spektrum (By) ; Spektrum (Bz) ; Spektrum (Be)

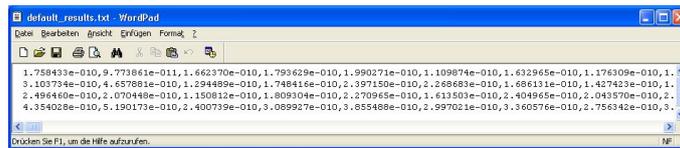


Abbildung 3.10: Aufbau der Ergebnisdatei

**3.3.3 C.A 42**

Über das Menü *C.A 42* (vgl. Abbildung 3.11) können aktuelle Messwerte und Einstellungen des Messgeräts abgefragt werden. Durch Betätigen der *Measure*-Schaltfläche werden die aktuellen Daten vom Feldstärkemessgerät abgefragt. Über die *Cancel*-Schaltfläche gelangt man zurück ins Hauptmenü.

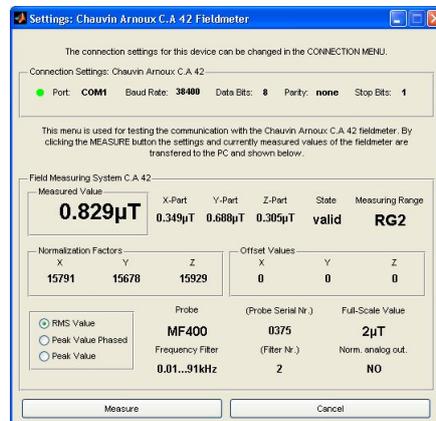


Abbildung 3.11: Einstellungen des *C.A 42* Feldstärkemessgeräts

## 3 Betrieb

## 3.3.4 R&amp;S FSH 3

Das Menü des *FSH 3* (vgl. Abbildung 3.12) ermöglicht nicht nur die Abfrage der aktuellen Konfiguration des Spektrumanalysators, es ist auch möglich, Einstellungen über einen Remotezugriff zu ändern. Die Frequenzbereichseinstellungen können über *Start-Frequency* und *StopFrequency* vorgenommen werden. Der eingestellte Frequenzbereich hat Auswirkung auf die zu wählende Verzögerungszeit (*Delay*). Außerdem kann die Wahl der Anzeigeeinheit (*AmplitudeLevelUnit*) und des verwendeten Detektors (*TraceDetector*) erfolgen.

Die Einheit V (Volt) wird bei der Wahl der Anzeigeeinheit empfohlen, da dadurch programmintern ein Berechnungsschritt weniger durchgeführt werden muss. Für die Bedeutung der restlichen Einstellungen wird auf das Bedienhandbuch des *FSH 3* verwiesen.

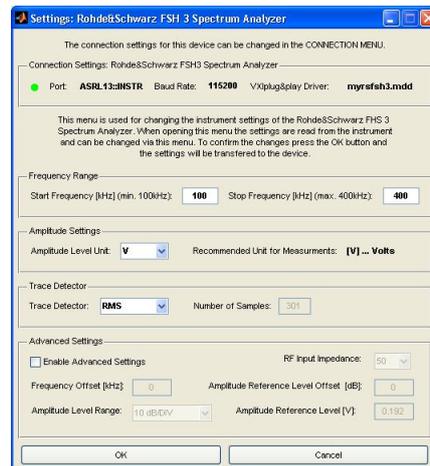


Abbildung 3.12: Einstellungen des *Rohde&Schwarz FSH 3* Spektrumanalysators

## 3.3.5 Hardware AchsenSwitch-CA42

Um die Funktion des *AchsenSwitch-CA42* testen zu können, muss in der Hauptoberfläche die *Switch*-Schaltfläche angeklickt werden. Im erscheinenden Untermenü (vgl. Abbildung 3.13) kann, durch Anklicken einer der Achsen mit der rechten Maustaste,

3 Betrieb

ein bestimmter Kanal eingeschaltet werden. War dieser Vorgang erfolgreich, so erfolgt eine farbliche Markierung des ausgewählten Kanals.

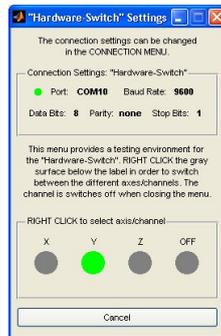


Abbildung 3.13: Hardwareeinstellungen

### 3.3.6 Figure-Panel

Über das *Figure*-Panel (vgl. Abbildung 3.14) können Einstellungen, welche die darzustellenden Diagramme betreffen, durchgeführt werden.



Abbildung 3.14: *Figure*-Panel in der Hauptbenutzeroberfläche

Die folgende Auflistung gibt Aufschluss über die wählbaren Einstellungen:

- ***Express B in [T]***

Genau genommen wird die Spektralanalyse der in den einzelnen Spulen der Messsonde *MF400* induzierten Spannungssignale durchgeführt. Die Einheit der Amplitude des Spektrums ist daher abhängig von der Einstellung der *Amplitude-LevelUnit* des *FSH 3*. Sie kann mit Hilfe eines Umrechnungsfaktors in die äquivalente von der Magnetfeldsonde gemessene magnetische Flussdichte *B* umgerechnet werden. Ist diese Option aktiviert, so erfolgt die Darstellung der Amplitude des Spektrums in Tesla, der Einheit der magnetischen Flussdichte.

## 3 Betrieb

- ***ImPLY Correction Factors***

Durch diese Einstellung können die Kalibrierungsfaktoren für die Magnetfeldsonde *MF400* miteinbezogen werden (vgl. Abschnitt 2.2.4).

- ***Show Reference Levels***

Zusätzlich zu den Spektren erfolgt auch die Anzeige der implementierten Referenzwerte für den ausgewählten Frequenzbereich (vgl. Abschnitt 2.2.5).

- ***Show Exceeded Values***

Amplitudenwerte des Spektrums, die die Referenzwerte übersteigen, werden im Diagramm markiert.

- ***Log X***

Die Frequenzachse (x-Achse) wird logarithmisch dargestellt

- ***Log Y***

Die Amplitudenachse (y-Achse) wird logarithmisch dargestellt

- ***Separate Window***

Ist diese Option aktiviert, so werden die Diagramme nicht nur in der Hauptbenutzeroberfläche dargestellt, sondern auch in einem externen Fenster. Aus Performancegründen wird die Aktivierung dieser Option erst nach der durchgeführten Messung empfohlen. Zusätzlich kann durch Anklicken eines Diagramms in der Hauptbenutzeroberfläche ein neues Fenster geöffnet werden und das entsprechende Diagramm wird vergrößert dargestellt.

### 3.4 Durchführen einer Messung

Die Software erlaubt die Durchführung von zwei verschiedenen Messungsarten. In der Hauptbenutzeroberfläche (vgl. Abbildung 3.2) können Sie über die Schaltflächen *Start Measurement* und *Single Measurement* gestartet werden.

## 3 Betrieb

Die Messung eines Einzelspektrums wird durch Betätigen der *Single Measurement*-Schaltfläche durchgeführt. Dabei wird das Spektrum jeder Achse einmal gemessen und im Anschluss erfolgt die Berechnung der magnetischen Ersatzflussdichte nach (2.1).

Beim Betätigen der *Start Measurement*-Schaltfläche wird ein Messvorgang über die eingestellte Gesamtmessdauer mit dem eingestellten Intervall durchgeführt. Nach jeder Einzelmessung wird die magnetischen Ersatzflussdichte berechnet und nach Abschluss erfolgt eine Mittelung nach (2.2).

## 4 Technische Daten

<b>Typ:</b>	<i>AchsenSwitch-CA42</i>
<b>Seriennummer:</b>	0001
<b>Herstellungsjahr:</b>	2010
<b>Nennspannung:</b>	28VDC
<b>Nennstrom:</b>	140mA
<b>Frequenzbereich:</b>	100kHz - 400kHz
<b>Kommunikation:</b>	USB Typ B
<b>Abmessungen:</b>	Breite: 125mm / Höhe: 80mm / Tiefe: 130mm
<b>Netzversorgung:</b>	230V, 50Hz

Die Spannungsversorgung des *AchsenSwitch-CA42* darf ausschließlich nur mit dem Steckernetzteil *MeanWell ES18B28-P1J* erfolgen.

## 5 Zubehör

- 4 Stk. BNC-Messleitungen (50 $\Omega$ , 1m)
- 4 Stk. SMA/BNC-Adapter
- 1 Stk. USB-Anschlusskabel (Typ A auf Typ B, 1,8m)
- 1 Stk. Steckernetzteil *MeanWell ES18B28-P1J*
- 1 Stk. Gebrauchsanweisung



## ÖSTERREICHISCHER KALIBRIERDIENST

AKKREDITIERT DURCH DAS  
BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT

Kalibrierlaboratorium für Antennen und Feldsonden  
Calibration laboratory for antennas and field probes

EH-A285/09
ÖKD 13
19.05.2009

KALIBRIERSCHEIN  
CALIBRATION CERTIFICATE

EH-A285/09

KALIBRIERZEICHEN  
CALIBRATION MARK

<p>Gegenstand <i>Object</i></p> <p>Hersteller <i>Manufacturer</i></p> <p>Typ <i>Type</i></p> <p>Herstellernummer <i>Serial number</i></p> <p>Auftraggeber <i>Customer</i></p> <p>Auftragsnummer <i>Order Nr.</i></p> <p>Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i></p> <p>Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i></p>	<p>Isotropic Magnetic Field Probe (a) with Field Analyzer (b)</p> <p>a+b) Chauvin Arnoux</p> <p>a) MF-400 b) CA-42</p> <p>a) 100375AEK b) 100433AEK</p> <p>TU Graz Institut für Health Care Engineering Inffeldgasse 18 8010 Graz Österreich</p> <p>L.L7.00014.0.0 -A-1847_1</p> <p>1 – 6</p> <p>19.05.2009</p>	<p>Der Österreichische Kalibrierdienst ist Unterzeichner des Multilateralen Übereinkommens der European Cooperation for Accreditation (EA) zur gegenseitigen Anerkennung von Kalibrierscheinen und Mitglied der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC). Die Kalibrierung erfolgt auf der gesetzlichen Grundlage der §§ 58 und 59 des Maß- und Eichgesetzes BGBl. Nr. 152/1950 in gültiger Fassung. Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI). Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.</p> <p>The Österreichische Kalibrierdienst is signatory to the multilateral agreement of the European Co-operation for Accreditation (EA) for mutual recognition of calibration certificates and member of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC). The calibration is performed in accordance with the law concerning legal metrology, federal gazette Nr. 152/1950, last amended with federal gazette Nr. 468/1992. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realise the physical units of measurements according to the International system of Units (SI). The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals</p>
--	---	--

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverarbeitet werden. Auszüge oder Änderungen sind unzulässig. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

*This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signature and seal are not valid.*

<p>Stempel <i>Seal</i></p>	<p>Datum <i>Date</i></p>	<p>Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i></p>	<p>Bearbeiter <i>Person responsible</i></p>
	<p>19.05.2009</p>	<p>DI Wolfgang Müllner, MAS</p>	<p>DI Dr. Patrick Preiner</p>

Austrian Research Centers GmbH - ARC

A-2444 Seibersdorf Tel. +43 (0) 50550-2800 Fax: +43 (0) 50550-2813 Web: www.seibersdorf-rc.com e-mail: itr@arcs.ac.at  
Rechtsform: GmbH Sitz: Wien Firmenbuchgericht: Handelsgericht Wien Firmenbuchnummer: FN 115980i DVR: 0594636 USI-IDNr.: ATU14703506

## Calibration Procedure

Calibrations are carried out as required by IEEE Std 1309-2005 [1] and are described in Annex 2, working procedures AA 2-7/K-1, AA 2-7/K-2 and AA 2-7/K-3 of the ISO 9001 certified quality management system handbook 2-7.

### Measurement Equipment

The instruments and standards used in this calibration are traceable to National or International Standards

Instrument	Model	Identification
Signal Generator	Agilent 33220	E0205
Signal Generator	R&S SMH	E0211
Digital Multimeter	Keithley 2001	E0165
Power Meter	E4418B	E0158
Power Sensor	E9304A	E0155
Attenuator	MCE/Weinschel 3dB	E1211
Attenuator	Narda 30dB	E1219
Attenuator	Radiall 10dB	E1275
TEM-cell	ÖFZS	E1021
Induction Coil	ÖFZS	E0498

### Environment Conditions

	Temperature	Humidity
Control Room + TEM-Cell	21 °C	42%

### Calibration Method

Frequency Range	Field Generation Facility and Device Type	Calibration Method
DC – 10 kHz	Induction Coil	Calibration using Calculated Field Strength
10 – 400 kHz	TEM-cell	Calibration using Calculated Field Strength

### Probe Orientation during Calibration

Physical minor axis alignment: Probe axis is perpendicular to the applied E-field and parallel to the H-field

### Calibration Frequencies

Type	Description	Frequency Range
F4	10 frequencies per decade	10 Hz - 400 kHz

### Amplitude Levels

Type	Description	Field Strength Level
A1	Level(s) for each selected frequency point	1.26 $\mu$ T and 10 $\mu$ T

### Isotropy

Grade	Description	Frequency
I2	Isotropy at physical minor alignment (rotate around the handle or mounting device)	50 Hz

**Illumination (immersion) conditions**

Grade	Description	Frequency range
FI	Full illumination for sensor head, resistive feed lines	DC – 10 kHz
PI	Partial illumination for sensor head only	DC – 150 MHz

**Calibration type and modulation**

Grade	Description	Frequency range
TD	Calibration is done by using a field that is measured in the frequency domain	10 Hz - 400 kHz
MO	No modulation, CW field used	

**Results**

Correction factors apply to field strength units:

$$\text{instrument reading} \times \text{linear correction factor (c.f.)} = \text{actual} \quad (\text{T})$$

Data	Parameter	Figure/Table
Correction Factors	10 $\mu\text{T}$	Figure 1, Table 1
Correction Factors	1.26 $\mu\text{T}$	Figure 2, Table 2
Isotropy	10 $\mu\text{T}$ and 50 Hz	Table 3
Linearity	50 Hz	Table 4

**Uncertainty**

The associated expanded uncertainty of the generated field is:

Field Type	Frequency Range	Expanded Uncertainty
B	DC - 10 kHz	$\pm 5 \%$
B	10 kHz - 400 kHz	$\pm 15 \%$

Any quoted uncertainty refers only to the measured value at the time of calibration and does not carry any implication regarding the long-term stability of the field probes.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k = 2$ , which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with EAL Publication EA-4/02.

**References**

- [1] IEEE Std 1309-2005, "IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz". IEEE, 3 Park Avenue, NY 10016-5997, USA

Figure 1: Correction Factors at 10  $\mu$ T

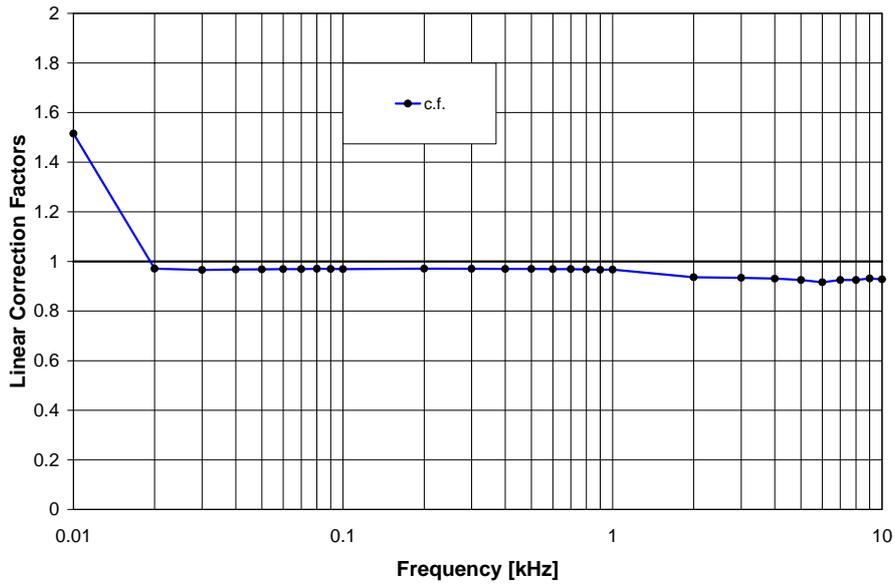


Table 1: Correction Factors at 10  $\mu$ T

Frequency [kHz]	c.f.	
	linear	[dB]
0.01	1.52	3.61
0.02	0.97	-0.26
0.03	0.97	-0.30
0.04	0.97	-0.29
0.05	0.97	-0.28
0.06	0.97	-0.27
0.07	0.97	-0.27
0.08	0.97	-0.26
0.09	0.97	-0.27
0.1	0.97	-0.27
0.2	0.97	-0.26
0.3	0.97	-0.26
0.4	0.97	-0.27
0.5	0.97	-0.27

Frequency [kHz]	c.f.	
	linear	[dB]
0.6	0.97	-0.27
0.7	0.97	-0.28
0.8	0.97	-0.29
0.9	0.97	-0.30
1	0.97	-0.29
2	0.94	-0.57
3	0.93	-0.59
4	0.93	-0.62
5	0.92	-0.68
6	0.92	-0.76
7	0.93	-0.68
8	0.93	-0.68
9	0.93	-0.62
10	0.93	-0.65

Figure 2: Correction Factors at 1.26  $\mu$ T

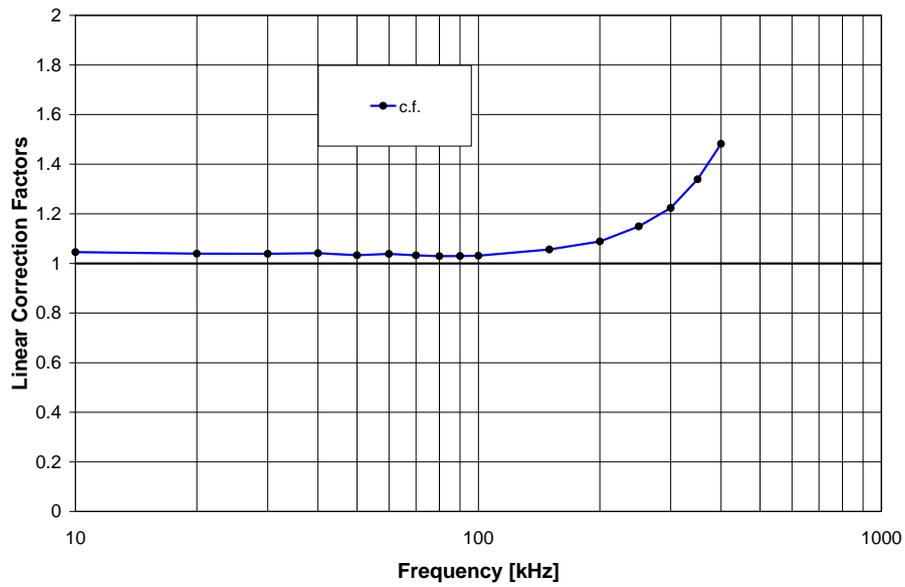


Table 2: Correction Factors at 1.26  $\mu$ T

Frequency [kHz]	c.f.	
	linear	[dB]
10	1.05	0.39
20	1.04	0.34
30	1.04	0.33
40	1.04	0.35
50	1.03	0.28
60	1.04	0.33
70	1.03	0.28
80	1.03	0.25

Frequency [kHz]	c.f.	
	linear	[dB]
90	1.03	0.25
100	1.03	0.27
150	1.06	0.48
200	1.09	0.73
250	1.15	1.21
300	1.22	1.75
350	1.34	2.53
400	1.48	3.42

Table 3: Anisotropy at 10  $\mu$ T and 50 Hz

Position [°]	0	45	90	135	180	225	270	315
c.f.	0.969	0.971	0.966	0.965	0.963	0.962	0.963	0.966

Anisotropy: 0.04 dB

Table 4: Linearity at 50 Hz

B Actual [ $\mu$ T]	B Reading [ $\mu$ T]	c.f.
0.99	1.00	0.99
1.98	2.07	0.96
2.98	3.12	0.96
3.98	4.16	0.96
5.01	5.22	0.96
5.96	6.21	0.96
7.00	7.30	0.96
7.95	8.30	0.96
9.02	9.41	0.96
10.01	10.44	0.96

C Berechnung des Spulenfaktors

### C Berechnung des Spulenfaktors

Im Folgenden wird der Spulenfaktor, der bei den Testmessungen verwendeten Spule, bestimmt. Mit dem *Biot-Savart*'schen Gesetz lässt sich die von einem Linienleiter im Punkt  $P$  hervorgerufene magnetische Flussdichte  $B$  berechnen (vgl. Abbildung 1). Gleichung (1) leitet sich aus dem *Biot-Savart*'schen Gesetz ab und wurde aus <sup>1</sup> übernommen.

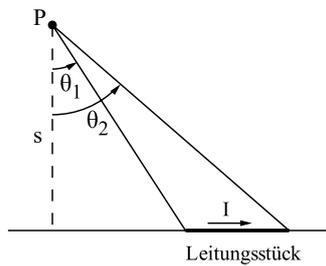


Abbildung 1: Linienleiter

$$B = \mu_0 I \cdot \frac{1}{4\pi s} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (1)$$

Die Länge des Linienleiters wird dabei durch die Winkel  $\theta_1$  und  $\theta_2$  sowie durch den Abstand  $s$  bestimmt. In weiterer Folge wird der Faktor  $k$  eingeführt, so dass sich (2) ergibt.

$$B = \mu_0 I \cdot k \quad \text{mit} \quad k = \frac{1}{4\pi s} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (2)$$

Um die magnetische Flussdichte  $B$  im Zentrum einer quadratischen Spule zu berechnen, werden die geraden Spulenabschnitte als Linienleiter angenommen (vgl. Abbildung 2). Für einen dieser Leiterabschnitte ergeben sich die Winkel  $\theta_1$  und  $\theta_2$  zu (3).

$$\theta_1 = -45^\circ = -\frac{\pi}{4} \quad ; \quad \theta_2 = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

Der daraus berechnete Faktor  $k$  für einen Leitungsabschnitt ergibt sich zu (4).

$$k = \frac{\sqrt{2}}{4\pi s} \quad (4)$$

<sup>1</sup>Griffiths, D.: Introduction to Electrodynamics. Prentice Hall (Third Edition)

C Berechnung des Spulenfaktors

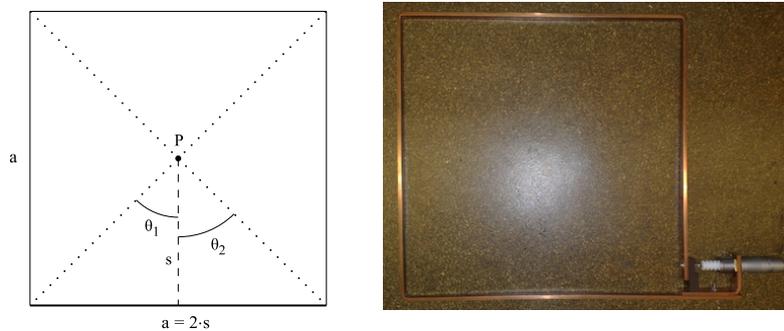


Abbildung 2: Spule

Die quadratische Spule wird näherungsweise aus vier dieser Leitungsabschnitte zusammengesetzt (vgl. Abbildung 2). Der Spulenfaktor  $k_{\text{Spule,calc}}$  ergibt sich somit zu (5).

$$k_{\text{Spule,calc}} = 4 \cdot k = \frac{\sqrt{2}}{\pi s} \quad (5)$$

Der für die Berechnung des Spulenfaktors benötigte Abstand  $s$  kann anhand der Seitenlänge  $a$  der Spule bestimmt werden (6). Der Spulenfaktor  $k_{\text{Spule,calc}}$  der quadratischen Leiterschleife ergibt sich zu (7).

$$a \approx 0.30 \text{ m} \rightarrow s = 2 \cdot a \approx 0.15 \text{ m} \quad (6)$$

$$k_{\text{Spule,calc}} = 4 \cdot k_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi s} \approx 3 \frac{1}{\text{m}} \quad (7)$$

Aufgrund von Fertigungstoleranzen der Spule und der bei der Berechnung nicht exakten Nachbildung der Spulenform ergibt sich der Spulenfaktor  $k_{\text{Spule,meas}}$ , der durch eine Feldstärkemessung bestimmt wurde (8).

$$k_{\text{Spule,meas}} = 2.94 \frac{1}{\text{m}} \quad (8)$$

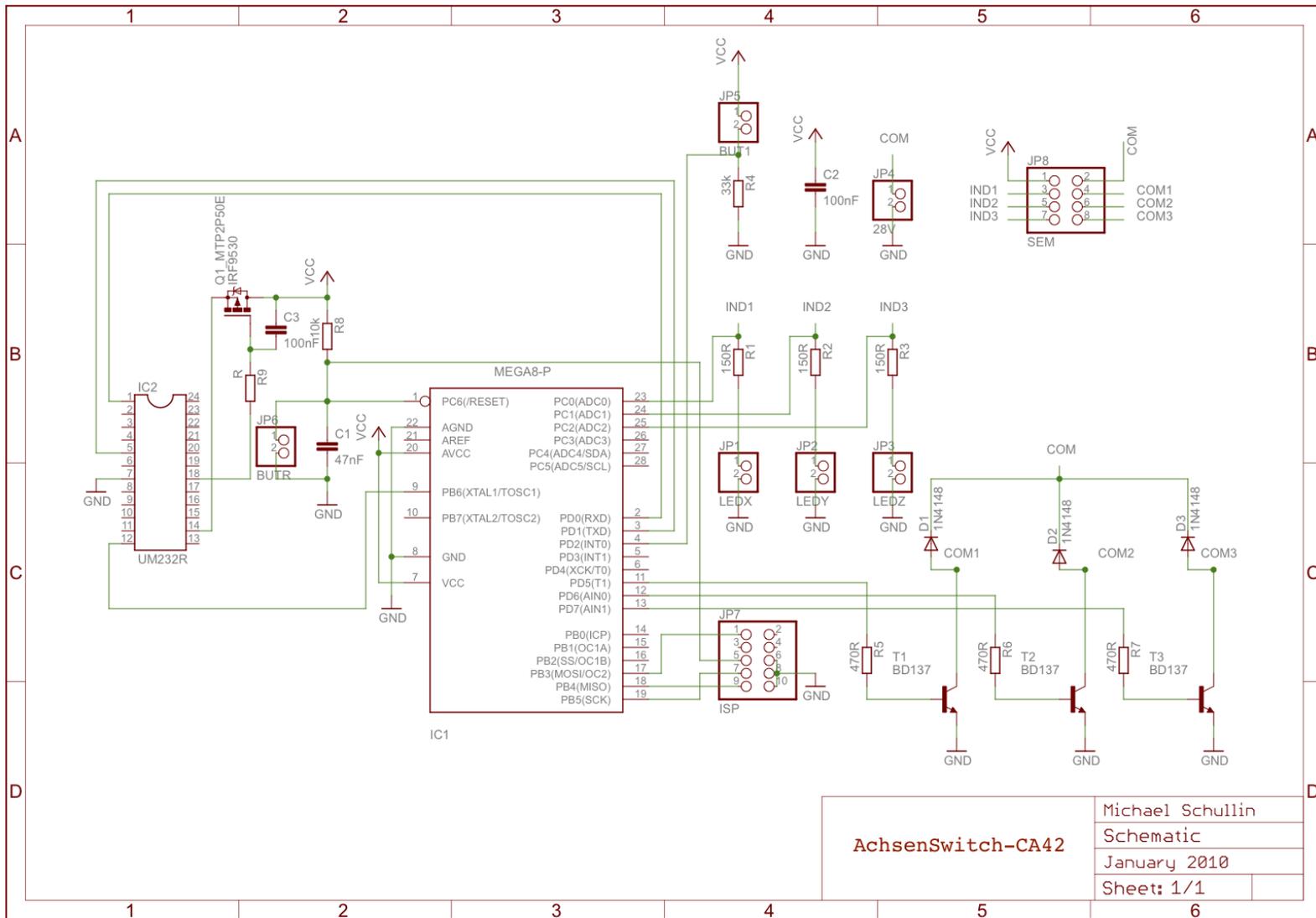
## D Hardware

### D.1 Bauteilliste

Die Leiterplatte (vgl. Seite 126) wurde mit den in Tabelle D.1 angegebenen Bauteilen bestückt.

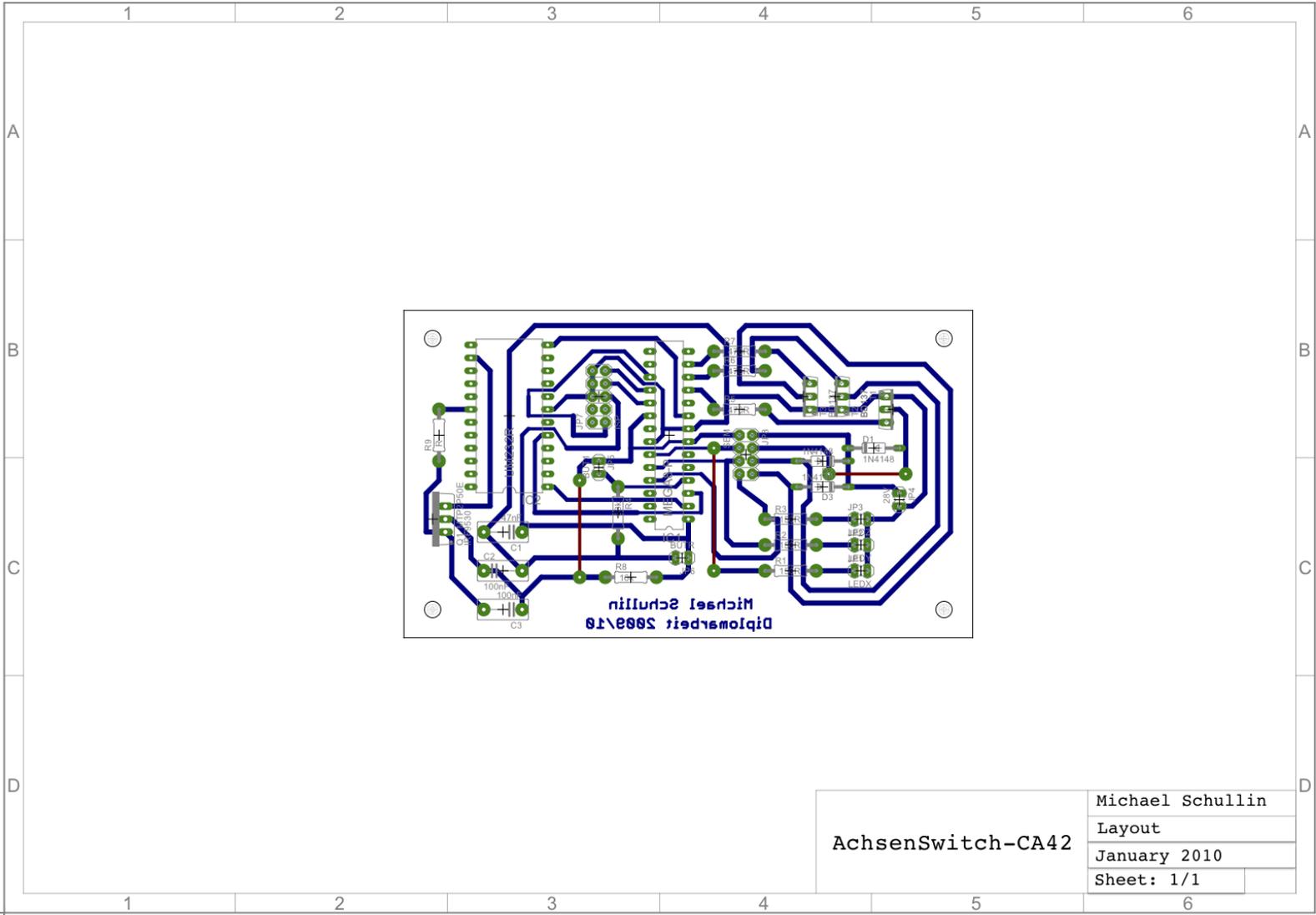
Stück	Bezeichnung	Typ / Wert
3	R1, R2, R3	150 $\Omega$
1	R4	33 k $\Omega$
3	R5, R6, R7	460 $\Omega$
1	R8	10 k $\Omega$
1	R9	-
1	C1	47 nF
2	C2,C3	100 nF
3	D1, D2, D3	1N4148
3	T1, T2, T3	BD137
1	Q1	MTP2P50E
12	JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP6	Lötstifte
1	JP7	Stiftleiste 2,54mm 10-polig
2	(JP7)	Buchsengehäuse 2,54mm 10-polig
1	JP8	Stiftleiste 2,54mm 8-polig
1	(JP8)	Buchsengehäuse 2,54mm 8-polig
3	LEDX, LEDY, LEDZ	Leuchtdiode grün
1	BUT1	Taster
1	IC1	UM232R (IC-Sockel DIP 24 0,6")
1	IC2	ATmega8 (IC-Sockel DIP 28 0,3")

Tabelle D.1: Bauteilliste für die Bestückung der Leiterplatte



## D.2 Schaltplan

C.3 Layout



Nr.	Pos.	MB	eingestellt / gemessen		berechnet B	C.A 42 + MF400								Messsystem (CA42 + MF400, Hardware, FSH 3, Software)							
			f	I		Bx		By		Bz		Be		Bx		By		Bz		Be	
			[kHz]	[mA]		-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF
8	z	1	200	49,9	184,36	13,1	14,26	17,6	19,15	177,1	192,72	178,45	194,2	3,66	3,98	1,05	1,14	153,12	166,63	153,17	166,68
7			250	50,3	185,83	11,2	12,87	16,9	19,42	158,8	182,48	160,09	183,96	3,35	3,85	1,19	1,37	143,89	165,35	143,93	165,4
6			300	49,8	183,99	12	14,68	15,2	18,6	145,1	177,53	146,39	179,11	2,87	3,51	1,31	1,6	127,3	155,75	127,34	155,8
5			350	49,9	184,36	12,2	16,33	16,4	21,96	126	168,69	127,65	170,89	2,51	3,36	3,89	5,21	107,97	144,55	108,07	144,68
1_2	z	2	200	99,9	369,08	15	16,32	16	17,41	333	362,38	333,72	363,16	9,6	10,45	2,07	2,26	308,11	335,29	308,27	335,46
2			250	100	369,45	15	17,24	17	19,53	327	375,76	327,78	376,66	9,11	10,46	2,59	2,98	291,94	335,47	292,09	335,65
3			300	99,9	369,08	15	18,35	18	22,02	298	364,61	298,92	365,73	7,92	9,69	2,13	2,61	264	323,01	264,13	323,16
4			350	100,1	369,82	13	17,4	18	24,1	266	356,11	266,93	357,35	2,81	3,76	5,94	7,96	231,13	309,43	231,22	309,56
9	z	2	200	150	554,18	20	21,76	18	19,59	507	551,73	507,71	552,5	14,42	15,69	2,68	2,92	458,36	498,8	458,59	499,05
10			250	149,4	551,96	20	22,98	18	20,68	474	544,68	474,76	545,56	13,71	15,75	1,92	2,21	433,92	498,62	434,14	498,88
11			300	149,9	553,81	17	20,8	19	23,25	443	542,02	443,73	542,91	12,3	15,05	2,62	3,21	392,36	480,06	392,56	480,3
12			350	150,3	555,29	16	21,42	19	25,44	396	530,16	396,78	531,2	3,99	5,34	8,54	11,43	343,81	460,28	343,94	460,46
13	x/y/z	2	200	100	369,45	164	178,47	128	139,29	261	284,03	333,77	363,21	140,56	152,96	110,92	120,71	226,77	246,78	288,94	314,43
14			250	99,7	368,34	152	174,67	118	135,6	242	278,09	309,18	355,28	135,02	155,15	105,67	121,43	216,54	248,83	276,2	317,38
15			300	100,2	370,19	141	172,52	109	133,36	223	272,84	285,47	349,27	122,53	149,92	96,39	117,93	196,42	240,32	250,77	306,82

Nr.	Pos.	MB	eingestellt / gemessen		berechnet B	C.A 42 + MF400				Messsystem (CA42 + MF400, Hardware, FSH 3, Software)							
			f	I		Bz (CF)		Bz (min)		Bz (max)		Bz (CF)		Bz (min)		Bz (max)	
			[kHz]	[mA]		[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]	[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]
8	z	1	200	49,9	184,36	192,72		158,53	-17,74	228,78	18,71	166,63	115,6	-30,63	234,58	40,78	
7			250	50,3	185,83	182,48		150,06	-17,76	216,68	18,74	165,35	114,71	-30,63	232,77	40,78	
6			300	49,8	183,99	177,53		145,96	-17,78	210,85	18,77	155,75	108,05	-30,63	219,27	40,78	
5			350	49,9	184,36	168,69		138,63	-17,82	200,42	18,82	144,55	100,28	-30,63	203,49	40,78	
1_2	z	2	200	99,9	369,08	362,38		295,08	-18,57	434,24	19,83	335,29	232,6	-30,63	472,02	40,78	
2			250	100	369,45	375,76		305,91	-18,59	450,37	19,86	335,47	232,73	-30,63	472,27	40,78	
3			300	99,9	369,08	364,61		296,46	-18,69	437,51	19,99	323,01	224,08	-30,63	454,72	40,78	
4			350	100,1	369,82	356,11		289,06	-18,83	427,98	20,18	309,43	214,66	-30,63	435,61	40,78	
9	z	2	200	150	554,18	551,73		451,2	-18,22	658,53	19,36	498,8	346,03	-30,63	702,2	40,78	
10			250	149,4	551,96	544,68		445,18	-18,27	650,46	19,42	498,62	345,91	-30,63	701,95	40,78	
11			300	149,9	553,81	542,02		442,73	-18,32	647,65	19,49	480,06	333,03	-30,63	675,81	40,78	
12			350	150,3	555,29	530,16		432,56	-18,41	634,13	19,61	460,28	319,32	-30,63	647,98	40,78	

Nr.	Pos.	MB	eingestellt / gemessen		berechnet B	C.A 42 + MF400				Messsystem (CA42 + MF400, Hardware, FSH 3, Software)							
			f	I		Be (CF)		Be (min)		Be (max)		Be (CF)		Be (min)		Be (max)	
			[kHz]	[mA]		[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]	[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]
13	x/y/z	2	200	100	369,45	363,21		293,35	-19,24	430,78	18,6	314,43	218,13	-30,63	442,65	40,78	
14			250	99,7	368,34	355,28		286,47	-19,37	421,41	18,61	317,38	220,18	-30,63	446,81	40,78	
15			300	100,2	370,19	349,27		281,09	-19,52	414,36	18,64	306,82	212,85	-30,63	431,94	40,78	

E Tabelle – Einzelmessungen

eingestellt / gemessen					berechnet	C.A 42 + MF400								Messsystem (CA42 + MF400, Hardware, FSH 3, Software)							
Nr.	Pos.	MB	f	I	B	Bx		By		Bz		Be		Bx		By		Bz		Be	
			[kHz]	[mA]	[nT]	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF	-	CF
22	z	2	200	100	369,45	14	15,24	18,7	20,35	354	385,23	354,77	386,07	5,95	6,47	5,29	5,76	307,13	334,23	307,23	334,34
						14	15,24	17	18,5	346	376,52	346,7	377,29	5,87	6,39	5,17	5,63	306,85	333,92	306,95	334,03
						15	16,32	19	20,68	352	383,05	352,83	383,96	5,99	6,52	5,34	5,81	306,92	334	307,02	334,11
						<b>Mittelwert:</b>		<b>14,33</b>	<b>15,6</b>	<b>18,23</b>	<b>19,84</b>	<b>350,67</b>	<b>381,6</b>	<b>351,43</b>	<b>382,44</b>	<b>5,94</b>	<b>6,46</b>	<b>5,27</b>	<b>5,73</b>	<b>306,97</b>	<b>334,05</b>
18	x/y/z	2	200	99,9	369,08	163	177,38	125	136,03	261	284,03	332,14	361,44	141,18	153,64	111,06	120,86	226,99	247,02	289,47	315
						162	176,29	128	139,29	260	282,94	332,01	361,3	141,5	153,98	111,16	120,97	227,93	248,04	290,4	316,02
						164	178,47	128	139,29	261	284,03	333,77	363,21	141,54	154,03	111,16	120,97	226,87	246,88	289,59	315,13
						<b>Mittelwert:</b>		<b>163</b>	<b>177,38</b>	<b>127</b>	<b>138,2</b>	<b>260,67</b>	<b>283,66</b>	<b>332,64</b>	<b>361,98</b>	<b>141,41</b>	<b>153,88</b>	<b>111,13</b>	<b>120,93</b>	<b>227,26</b>	<b>247,31</b>
16	x/y/z	2	250	100,3	370,56	152	174,67	120	137,89	235	270,04	304,51	349,92	134,36	154,39	106,78	122,7	218,28	250,83	277,67	319,07
						153	175,81	115	132,15	244	280,38	310,11	356,35	134,88	154,99	106,21	122,05	217,43	249,85	277,04	318,35
						153	175,81	118	135,6	244	280,38	311,24	357,65	135,74	155,98	106,8	122,73	217,38	249,79	277,64	319,04
						<b>Mittelwert:</b>		<b>152,67</b>	<b>175,43</b>	<b>117,67</b>	<b>135,21</b>	<b>241</b>	<b>276,94</b>	<b>308,62</b>	<b>354,64</b>	<b>134,99</b>	<b>155,12</b>	<b>106,6</b>	<b>122,49</b>	<b>217,7</b>	<b>250,16</b>
17	x/y/z	2	300	100,3	370,56	141	172,52	110	134,59	223	272,84	285,85	349,74	122,72	150,15	96,66	118,27	197,26	241,35	251,62	307,87
						142	173,74	109	133,36	218	266,73	282,08	345,13	123,9	151,59	96,08	117,56	197,18	241,25	251,92	308,23
						142	173,74	109	133,36	223	272,84	285,96	349,88	123,74	151,4	96,29	117,81	197,2	241,28	251,94	308,25
						<b>Mittelwert:</b>		<b>141,67</b>	<b>173,33</b>	<b>109,33</b>	<b>133,77</b>	<b>221,33</b>	<b>270,8</b>	<b>284,63</b>	<b>348,25</b>	<b>123,45</b>	<b>151,05</b>	<b>96,34</b>	<b>117,88</b>	<b>197,21</b>	<b>241,29</b>

Mittelwert					C.A 42 + MF400								Messsystem (CA42 + MF400, Hardware, FSH 3, Software)							
Nr.	Pos.	MB	f	I	B	Bz (CF)		Bz (min)		Bz (max)		Bz (CF)		Bz (min)		Bz (max)				
			[kHz]	[mA]	[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]	[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]				
22	z	2	200	100	369,45	381,6		310,93	-18,52	457,01	19,76	334,05	231,74	-30,63	470,27	40,78				

$u_{cf} = \pm 15\%$  ;  
 $u_{ca42} = \pm 3\% \pm 4 \text{ digits}$

$u_{cf} = \pm 15\%$  ;  
 $u_{ca42} = \pm 3\%$  ;  
 $u_{fsh3} = \pm 1,5 \text{ dB}$

Mittelwert					C.A 42 + MF400								Messsystem (CA42 + MF400, Hardware, FSH 3, Software)							
Nr.	Pos.	MB	f	I	B	Be (CF)		Be (min)		Be (max)		Be (CF)		Be (min)		Be (max)				
			[kHz]	[mA]	[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]	[nT]	[nT]	[nT]	[%]	[nT]	[%]				
18	x/y/z	2	200	99,9	369,08	361,98		292,33	-19,24	437,06	20,74	315,38	218,79	-30,63	444	40,78				
16	x/y/z	2	250	100,3	370,56	354,64		285,91	-19,38	428,81	20,91	318,82	221,18	-30,63	448,84	40,78				
17	x/y/z	2	300	100,3	370,56	348,25		280,23	-19,53	421,84	21,13	308,11	213,75	-30,63	433,76	40,78				

$u_{cf} = \pm 15\%$  ;  
 $u_{ca42} = \pm 3\% \pm 4 \text{ digits}$

$u_{cf} = \pm 15\%$  ;  
 $u_{ca42} = \pm 3\%$  ;  
 $u_{fsh3} = \pm 1,5 \text{ dB}$

F Tabelle – kontinuierliche Messungen