

HAW Hamburg

Bachelorarbeit

Umwelttechnik

Thema:

**Entwicklung einer Methode zur Kabel- und
Antennenkalibrierung mit Hilfe von
Reflexionsmessungen für ein HF Radar
System zur Meeresströmungsanalyse**

zum Erlangen des akademischen Grades

Bachelor of Science

Eingereicht von: Florian Hoffmann



Eingereicht am: 23.6.2014

1.Gutachter (HAW): Prof. Dr. Heiner Kühle
HAW Bergedorf
Lohbrügger Kirchstrasse 65
21033 Hamburg, Bergedorf

2.Gutachter (Praxis): Dipl.Ing. Thomas Helzel
Helzel Messtechnik GmbH
Carl-Benz-Strasse 9
24568 Kaltenkirchen

Sperrvermerk

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne Informationen der Firma Helzel Messtechnik GmbH. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften - auch in digitaler Form - bedürfen der Genehmigung der Firma Helzel Messtechnik GmbH.

Der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Hamburg ist es genehmigt, ihren Studierenden diese Arbeit als Beispiel zur Verfügung zu stellen.

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung

Hiermit erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen wurden als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vor- gelegt.

Hamburg, den 19.06.2014

Unterschrift:

Vorwort

Ich bedanke mich bei der Firma Helzel Messtechnik GmbH, dass sie mir das Anfertigen dieser Arbeit ermöglicht hat.

Mein Dank gilt außerdem allen Mitarbeitern und Vorgesetzten der Firma Helzel Messtechnik GmbH, die stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Im besonderen Bedanke ich mich bei Herr Thomas Helzel und Herr Matthias Kniephoff dafür, dass sie mir alle Zeit und Freiheit zur Verfügung gestellt haben, die zum Anfertigen der Arbeit nötig war.

Als letztes möchte ich mich hier bei Herr Heiner Kühle, meinem betreuenden Professor, für alles bedanken, dass er während meines Studiums und zuletzt auch während meiner Thesis für mich getan hat.

Abbildungsverzeichnis

Abb.1	-	N- Stecker	3
Abb.2	-	20dB Dämpfer	7
Abb.3	-	Veranschaulichung Signaltransport und Reflexion	10
Abb.4	-	Ersatzschaltbild Antenne [6]	13
Abb.5	-	Richtcharakteristik 2 Antennen	15
Abb.6	-	Richtcharakteristik 5 Antennen	15
Abb.7	-	Potentialverteilung $\lambda/4$ Strahler [7]	17
Abb.8	-	Skizze Groundplane Antenne [8]	17
Abb.9	-	Signalwege des Receiver Input Filter [4]	19
Abb.10	-	Filter mit eingelötetem Kippschalter	19
Abb.11	-	Skizze Signalwege Quadraturmischung	20
Abb.12	-	Aircell©7 Kabel mit Kabeltrommeln	22
Abb.13	-	Splitterbox der Firma Helzel	22
Abb.14	-	ESB Antenne mit Anpassungsschaltung	23
Abb.15	-	Anpassungsschaltung mit Kunststoffgehäuse	23
Abb.16	-	Aufgebaute Antenne	23
Abb.17	-	FSH3 von Rhode&Schwarz	24
Abb.18	-	WERADesk graphical user interface	25
Abb.19	-	Messsoftware graphical user interface	26
Abb.20	-	Ausgabe .TXT File	27
Abb.21	-	Ausgabe nach DPT	28
Abb.22	-	Messreihen Kombination 1	35
Abb.23	-	Messreihen Kombination 2	36
Abb.24	-	Messreihen Kombination 3	36
Abb.25	-	Skizze des Messaufbaus	37
Abb.26	-	4 Antennen Rx Array des Feldversuchs	37
Abb.27	-	Gegenüberstellung der Messwerte des Feldversuchs	38
Abb.28	-	1 zu 2 Splitter	39
Abb.29	-	Tx Antenne	42
Abb.30	-	Rx Antenne	42
Abb.31	-	Skizze Signalwege 1 zu 2 Splitter	46
Abb.32	-	Regressionen Standort 1	47
Abb.33	-	Regressionen Standort 2	48
Abb.34	-	Blindtest 1	50
Abb.35	-	Blindtest 2	50
Abb.36	-	Blindtest 3	50
Abb.37	-	Extrem-Test	52
Abb.38	-	geänderter Untergrund	52
Abb.39	-	provisorischer Kabelkanal	53
Abb.40	-	Verlauf RMS Werte	54
Abb.41	-	Verlauf Phasenwerte	55
Abb.42	-	Verlauf RMS oberhalb Resonanzfrequenz	56
Abb.43	-	Regression Pflasterstein	58
Abb.44	-	Auswertung neue Regression	59

Begriffs- und Abkürzungserklärung:

Helzel	- Helzel Messtechnik GmbH
ESB	- Ersatzschaltbild
Tx	- Transmitterseite eines Funkübertragungssystems
Rx	- Receiverseite eines Funkübertragungssystems
LO-Signal	- local oscillator signal; Hilfssignal das nur intern benutzt wird und dem herunter Mischen ins Basisband dient
RF-Signal	- radio frequency signal; eine über eine Funkstrecke versendetes Signal zwischen 3kHz und 300 GHz
Basisband	- Frequenzbereich der durch die Differenzbildung zwischen LO und RF entsteht
ADC	- Analog-Digital-Converter
WERA	- Wellen Radar
Xojo©	- Eine Programmierumgebung in RealBasic
Shell	- eine Prozessumgebung in Linux, die dem Command Line Client in DOS entspricht. Von hier aus können Parallelprozesse über einfache Befehlseingaben gestartet werden. In Xojo© besteht die Möglichkeit diese als synchrone Shell zu starten. Synchron bedeutet in diesem Fall, dass der geschriebenen Xojo© Code erst weiter verarbeitet wird, wenn die Shell ihren Prozess beendet hat.
BinaryStream	- eine Xojo© Klasse die verwendet werden kann um Werte Byte-diskret aus einer Textdatei auszulesen
Loop	- eine Programmschleife die entsprechend einer definierten Menge immer wieder durchlaufen wird.
ListBox	- Eine Xojo© Klasse die eine Auflistung bestimmter Werte und deren Abfrage ermöglicht
LibreOffice	- ein Tabellenkalkulationsprogramm für Linux
L_a	- Induktivität der Antenne
C_a	- Kapazität der Antenne
R_a	- ohmscher Widerstand der Antenne
Z_a	- Impedanz der Antenne
N-Stecker	- eine Kabelverbinder-Bauart mit Überwurfmutter zur Fixierung.(Abb.1)



Abb.1 - N-Stecker

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
1.1 Motivation	6
1.2 Aufgabenstellung	8
2 Theoretische Grundlagen	9
2.1 Verkürzungsfaktor	9
2.2 Reflexion am offenen Ende	9
2.3 Reflexionsfaktor	10
2.4 Standing Wave Ration (SWR)	11
2.5 Physikalische Antennen-Grundlagen	12
2.6 Richtcharakteristik	14
2.7 Beam Forming	16
2.7 Antennentypen	17
3 Hardware	18
3.1 Komponenten	18
3.2 Receiver Rack	18
3.3 Frequency Control Rack	21
3.4 AirCell©7 Kabel	22
3.5 Splitterbox	22
3.6 Antennen	22
3.7 Spectrum Analyzer	24
4 Software	25
4.1 Oberflächen	25
4.2 Hintergrund Prozesse	27
4.2.1 Messsoftware	27
4.2.2 Automatischer Shell Prozess	29
5. Messungen	30
5.1 Systemspezifische Bedingungen	30
5.2 Kabelkalibrierung	31
5.2.1 Experimentelle Randbedingungen	31
5.2.2 Versuche	34
5.3 Antennenkalibrierung	39
5.3.1 Ansätze	39
5.3.2 Experimentelle Randbedingungen	39
5.3.3 Messaufbau	42
5.3.4 Bestimmen der veränderten elektrischen Kabellänge	42

5.3.5 Bestimmung der Bandpass Eigenschaften	43
5.3.6 Erstellen einer Kalibrierfunktion	46
6 Auswertung und Ausblick	53
6.1 Auswertung Kabelkalibrierung	53
6.1.1 Laborversuch	53
6.1.2 Feldversuch	53
6.2 Auswertung Antennenkalibrierung	56
6.3 Abschlussbetrachtung und Ausblick	59
7 Literatur- und Quellenverzeichnis	62
8 Anhang	63
8.1 Aircell©7 Datenblatt	63
8.2 Antennenbauplan	65
8.3 Messwerte Feldversuch	66
8.4 Messwerte Regressionen Standort 1 und 2	71
8.5 Messwerte Regression Pflasterstein	77

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Wissen über Oberflächen-Meeresströmungen zu bestimmten Zeiten ist ein wichtiges Thema in der Ozeanographie und der Schifffahrt. Mit dieser Information können zum Beispiel Vorhersagen über Wetterlagen getroffen, Navigationskorrekturen frühzeitig eingeplant oder eventuell auftretende Tsunami Ereignisse vorhergesagt werden. Ebenso kann mit Hilfe von gespeicherten Daten über die Oberflächen-Meeresströmungen der Weg nachvollzogen werden den Ölteppiche zurückgelegt haben. Weiterhin ist durch diese Extrapolation und GPS Daten der Tanker, die diesen Bereich in den letzten Stunden kreuzten, der eventuelle Verursacher ermittelt werden.

Eine der dabei gängigen Methoden ist zum Beispiel der Einsatz von Strömungsbojen. Diese können jedoch immer nur Strömungsdaten aus einem kleinen Bereich liefern. Ein weiteres Problem dieser Bojen ist, dass sie, vor allem in ärmeren Ländern, oftmals das Opfer von Technik-Plünderung durch Fischer sind oder durch deren Netze, die sich in den Verankerungsketten der Bojen verfangen, beschädigt werden.

Durch den Einsatz eines WERA Messsystems können hier jedoch auch Daten über Oberflächen- Meeresströmungen in einem großen Messbereich vom Ufer aus gewonnen werden.

Das WERA Messsystem ist ein frequenzmoduliertes Dauerstrichradar System welches der Messung von Meeresströmungen mittels des Bragg Effektes dient.

Die grundsätzliche Idee hinter dem System ist, dass elektromagnetische Wellen im Megahertz Bereich, bedingt durch die Leitfähigkeit des Meerwassers, an die Meeresoberfläche ankoppeln. Und wiederum mechanische, also Meereswellen, diese wieder zurück werfen. Entsprechend der Bragg Gleichung kommt es hierbei zu positiven Interferenzen wenn es sich um mechanische Wellen handelt deren Wellenlänge genau der Hälfte der Wellenlänge der elektromagnetischen Welle entspricht.

Bedingt durch das Ankoppeln der elektromagnetischen Welle an die Meeresoberfläche erfährt das Signal hierbei einen von der Oberflächenströmung abhängigen Doppler-Shift.

Der Doppler-Shift des zurück geworfenen „Echos“ verhält sich nach der Formel:

$$(1.1.1) \quad f_D = \sqrt{\frac{gf_0}{\pi c}} - 2f_0 \frac{v}{c}$$

Wobei mit v die Strömungsgeschwindigkeit der Meeresoberfläche an einer bestimmten Stelle des Messbereichs gemeint ist, f_0 die eigentliche Radar Frequenz beschreibt und f_D die Doppler Shift behaftete Frequenz die die Empfangsantennen erreicht definiert[3].

Um die zurück geworfenen Signale aufzunehmen wird am Ufer in ausreichender Entfernung zum Sendeantennen-Array ein lineares Array aus Empfangsantennen aufgestellt. Dieses kann,

unter Zuhilfenahme eines „Beam Forming Algorithmus“, dem die Richtcharakteristik des Empfangsarrays zugrunde liegt, genutzt werden, um eine radiale Auflösung zu erreichen und so bestimmen zu können, aus welcher Richtung und aus welcher Entfernung das zurückgeworfene Signal kommt.

Nutzt man zwei solcher Arrays deren Ausrichtung senkrecht zu einander ist, kann man über vektorielle Verrechnung der Frequenzdifferenzen und der dazu gehörigen Phasen- und Amplitudenwerte eine 2 dimensionale Strömungskarte der Meeresoberfläche in einem bestimmten Messbereich anfertigen.

Für das optimale funktionieren des WERA Systems und dem integrierten „Beam Forming Algorithmus“ ist es unabdingbar, dass alle Phasenbeiträge der beteiligten Bauteile und vor allem die Phasenunterschiede der Antennen untereinander bekannt sind.

Beitrag zu den Phasenwerten die das WERA System misst liefern hierbei vor allem die Kabel, die Antennen sowie die internen Phasengänge der Messeinrichtung.

Bevor man also verlässliche Messwerte erhält, müssen die einzelnen Kabel, die Kanäle sowie idealer weise auch die Antennen und ihre Phasengänge kalibriert werden.



Abb.2 - 20dB Dämpfer

Bisher geschah dies während der Einrichtung des Systems über mehrere Transmissionsmessungen.

Um zum Beispiel die Kabel und Kanäle kalibrieren zu können wurden die Kabel der Eingangskanäle auf eine 1 zu 16 Splitterbox angeschlossen. An den Eingang dieser Splitterbox konnte nun direkt das Tx, also das Ausgangssignal, über einen 20 dB Dämpfer (Abb.2) angeschlossen werden. Im Verlauf mehrerer Messungen ist es dann möglich, die Phasengänge der einzelnen Kabel und der jeweiligen Kanäle zu bestimmen.

Sind diese Werte bekannt, folgt eine Transmissionsmessung, bei der ein Echo aus weiter Entfernung genutzt wird um das System und die Antennen aufeinander abzustimmen.

Hieraus resultieren jedoch zwei große Probleme:

1.) Um die Kalibrierung mit Hilfe der Splitterbox durchführen zu können müssen alle Kabel an einer Stelle zusammen geführt werden. Da die Abstände der Empfangsantennen $\lambda/2$ betragen müssen und in der Praxis die Kabel meist in unterirdischen Kanälen zu den Antennen geführt werden, sind die Kabelkalibrierungen vor dem Verlegen der Kabel durchzuführen. Da die Kabel beim Verlegen mechanisch beansprucht werden, können sich deren Phasengänge beim Verlegen noch einmal ändern.

2.) Die Phasengänge der Antennen ändern sich mit der Temperatur oder anderen Umgebungsparametern

Veränderte Phasengänge an den Antennen führen aber dazu, dass sich die Richtcharakteristik des Antennen-Array ändert(siehe Kapitel 2.4). Ist dies dem „Beam-Forming-Algorithmus“ nicht bekannt so werden eventuell Signale und die Richtung aus der sie an das Array gelangen doppeldeutig und nicht mehr genau auswertbar.

Ziel war es also einen Weg zu finden mit dem auf einfachem Wege die Kabel kalibriert, und mit gelegentlichen Reflexionsmessungen die Antennen nach kalibriert werden können.

Diese Überlegung stützt sich auf die Arbeit „Automatic Calibration Unit“ die im Jahr 2009 von Herr Oppermann im Rahmen seines Diploms im Fachbereich Informatik an der FH Wedel angefertigt wurde. Während dieser Arbeit entwickelte Herr Oppermann eine Methode, mit der Kabellängen über Reflexionsmessungen mit Hilfe des WERA Systems bestimmt werden können.

Dies wurde jedoch für eine Hardware umgesetzt, die so, aus Kostenüberlegungen, nicht serienmässig in das WERA System integriert wurde.

1.2 Aufgabenstellung

Beim Erarbeiten der Lösung werden zwei Dinge untersucht. Zunächst wird ermittelt ob sich die Transmissionsmessungen über die Splitterbox bei bestehender Hardware auch durch Reflexionsmessungen und eine interne Kalibrierung ersetzen lassen. Anschließend wird untersucht ob sich der Phasengang der Antennen aus Reflexionsmessungen bestimmen lässt. Für beide Aufgabenstellungen gilt, dass die gefundene Lösung einfach und schnell durchführbar sein muss.

Im Fall der Kabelkalibrierung soll das Einrichtungspersonal nicht unnötig lange mit der Kalibrierung beschäftigt sein. Beim Messen der Antenneneigenschaften soll der Vorgang in einigen wenigen Minuten erledigt werden können um eine gelegentliche, automatische Kalibrierung innerhalb eines Tages realisieren zu können.

Um die Messvorgänge direkt beginnen zu können war es zunächst nötig die Hardware etwas zu modifizieren und eine Software zu schreiben die entweder Messserien bei konstanter Frequenz oder über definierte Frequenzschritte durchführen kann.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Verkürzungsfaktor

Der Verkürzungsfaktor (VKF) beschreibt das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle in einem definierten Medium zur Vakuum Lichtgeschwindigkeit. Er ergibt sich bei Kabeln nur aus dem Kehrwert der Wurzel der Permittivität des Mediums zwischen Innen- und Aussenleiter des Kabels.

Verändert sich bei der mechanischen Beanspruchung der Kabel die Permittivität so verändert sich dadurch auch der Verkürzungsfaktor und damit auch gleichzeitig die Wellenlänge auf dem Kabel und der Phasengang des Kabels.

2.2 Reflexion am offenen Ende

Grundsätzlich ergibt sich bei der Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle in einer Leitung aufgrund der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von maximal c_0 eine Potentialverteilung auf der Leitung die der Formel: (Vorraussetzung: $u_s = 1$)

$$(2.2.1) \quad u_{(t;x)} = \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right)$$

entspricht.

Hierbei ist t die Zeit die seit dem „Eintritt“ des Wellenpakets in die Leitung vergangenen ist und x der Weg den das Signal in dieser Zeit auf der gegebenen Leitung zurückgelegt hat.

Das Signal hat also je nach Position auf der Leitung einen bestimmten Phasenwert und ein bestimmtes Potential angenommen.

Schickt man nun eine elektromagnetische Welle in eine Leitung mit offenen Ende so wird diese bei Erreichen des Endes eine bestimmte Phasenlage erreicht haben. Entsprechend dieser Phasenlage wird das Signal, im Fall einer offenen Leitung, komplett reflektiert und interferiert anschließend mit der hinlaufenden Welle zu einem resultierenden Signal der Form:

$$(2.2.2) \quad u_{(t;x)} = \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right) + \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right) + \phi_{\text{ref}}\right)$$

Wobei Φ_{ref} den Phasenwinkel beschreibt, welchen das Signal am Ende der Leitung angenommen hat.

Dieser Winkel entspricht auch der Phasenveränderung des Signals welche dem Kabel beim Signaltransport zugeschrieben werden kann.

Die folgende Grafik soll das Prinzip der Reflexion am offenen Ende verdeutlichen:

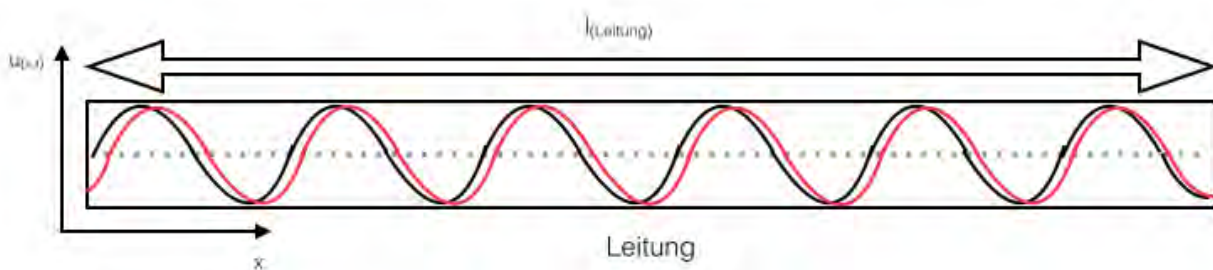


Abb.3 - Veranschaulichung Signaltransport und Reflexion

In der Abbildung 1 ist das schwarze Signal das hin- und das rote das rücklaufende Signal. Man kann hier also schon ungefähr erkennen, dass ein gemessener Phasenversatz zwischen hin- und rücklaufender Welle am Eingang der Leitung dem doppelten Phasenwert der Leitung entsprechen würde.

2.3 Reflexionsfaktor

Der im letzten Abschnitt beschriebene Zusammenhang der Reflexion gilt in dieser Form nur wenn der Abschlusswiderstand der Leitung gegen unendlich geht. Ist dies nicht gegeben, verändern sich sowohl Phase als auch Betrag des Signals bei der Reflexion, je nach dem wie groß der Unterschied der Impedanzen zwischen Leitung und Übergangswiderstand ist. Dieser Zusammenhang kann über folgende Formel beschrieben werden.[1]

$$(2.3.1) \quad r = \frac{Z_a - Z_l}{Z_a + Z_l}$$

Wobei Z_a die Impedanz hinter der Reflexionsstelle beschreibt und Z_l die der Leitung.

Da es sich hierbei um Impedanzen handelt, sind sowohl Z_a als auch Z_l komplex. Der Reflexionsfaktor hat also je nach Impedanzunterschied, der an einer Kontaktstelle entsteht, einen Betrag und ein Argument-Beitrag zum gemessenen Phasengang des Kabels.

Für die Berechnungen in dieser Arbeit nahm man für Z_l immer den Wert 50 Ohm an. Es wurde also immer nur Z_a als komplexer Wert eingesetzt.

Der Betrag des Reflexionsfaktors kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Wobei 1 einer total Reflexion also einer Reflexion am offenen Ende entspricht (Z_a geht gegen unendlich) und -1 einem kurzgeschlossenen Ende ($Z_a = 0$).

Alle Werte die zwischen diesen beiden liegen bedeuten, dass nur ein Teil der Energie des Signals an der Kontaktstelle reflektiert wurde und hierbei einem eventuellen Phasensprung unterlag während ein anderer Teil die Stelle passieren konnte.

2.4 Standing Wave Ration (SWR)

Die Standing Wave Ration beschreibt das Verhältnis der Amplituden der vor- und rücklaufenden Welle auf einer Leitung.

Sie wird formuliert als:[1]

$$(2.2.3) \quad SWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{V+R}{V-R}$$

Wobei hier V die Amplitude des vorlaufenden und R die des rücklaufenden Signals beschreibt.

Um diese messtechnisch ermitteln zu können, darf es nicht zu Mehrfachreflexionen auf der Leitung kommen. Das Signal darf also beim Erreichen des Kabelanfangs nicht noch einmal reflektiert werden.

Aufgrund eines Ausgangsseitigen Entkoppel-Kondensators wird beim WERA Messsystem immer mit mehrfach Reflexionen auf der Leitung zu rechnen sein. Es ist also nicht möglich mit dem WERA System eine genaue Aussage über das SWR zu treffen.[4]

Der grundsätzliche Zusammenhang kann jedoch trotzdem genutzt werden.

Aus der Überlagerung der beiden Wellen können auf der Leitung, je nach Wellenlänge, Länge der Leitung und Abschlusswiderstand sogenannte stehende Wellen entstehen. Dadurch existieren Stellen an denen das Potential immer den Wert null hat (Knotenpunkte) und andere Stellen an denen es zwischen $2u_{s,max}$ und $2u_{s,min}$ hin und her pendelt.

Dies kann man sich zur Kabellängenmessung mit dem WERA System zunutze machen.

Je nach Phasenwert am offenen Ende der Leitung, kann am Eingang der Leitung eine positive bzw. eine negative Interferenz aus den RMS Werten abgelesen werden.

Bei genauerer Betrachtung des Zusammenhangs kann festgestellt werden, dass positive Interferenzen immer dann auftreten wenn der Phasenversatz bei Erreichen des offenen Endes einem ungeraden, ganzzahligen Vielfachen von $\pi/4$ entspricht. Die negativen Interferenzen treten immer dann auf wenn der Phasenversatz am Ende des Kabels einem ganzzahligen Vielfachen von $\pi/2$ entspricht.

Mit dieser Information, dem Wissen über den Verkürzungsfaktor des Kabels und einer Messung über einen relativ weiten Frequenzbereich kann aus dem durchschnittlichen Abstand der Maxima der Überlagerung im Frequenzbereich die Kabellänge aus der Formel:

$$(2.2.4) \quad l = \frac{VKF \cdot c}{2 \cdot \Delta f}$$

berechnet werden.[4]

Dies ergibt sich aus dem genannten Zusammenhang zwischen Phasenlage des Signals am offenen Ende und der maximalen Amplitude der Überlagerung.

Bei zwei aufeinanderfolgenden Maxima im Frequenzbereich kann davon ausgegangen werden, dass folgende Zusammenhänge gelten:

$$(2.2.5) \quad \frac{l}{\lambda_1} \cdot \pi = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$(2.2.6) \quad \frac{l}{\lambda_2} \cdot \pi = (2n+3) \cdot \frac{\pi}{4}$$

Mit $n \in \mathbb{N}_{\geq 2}$, da, im Fall des WERA Systems, die Welle mindestens 1 mal in das Kabel „passen“ muss.

Hieraus folgt dann direkt der Zusammenhang:

$$(2.2.7) \quad f_2 - f_1 = \frac{VKF \cdot c}{4l} \cdot (2n+3) - \frac{VKF \cdot c}{4l} \cdot (2n+1)$$

Und nach ausklammern und auflösen schließlich:

$$(2.2.8) \quad \Delta f = \frac{VKF \cdot c}{2l}$$

Was nun nach l umgeformt werden kann.

2.5 Physikalische Antennen-Grundlagen

Grundsätzlich kann eine lineare Antenne als einseitig offenes Kabel gesehen werden, dessen Enden soweit auseinander gezogen werden bis sie im 180° Winkel zueinander stehen. Beaufschlagt man dieses nun mit einer Wechselspannung, wird sich durch die Schwingungen innerhalb der Leitung ein wechselndes B Feld ringförmig um die Leiter ausbilden und senkrecht dazu ein E Feld, dessen Anfang und Ende jeweils an den beiden Enden der Leiter liegen. Die Feldvektoren dieser Felder zeigen hierbei mit der Periode der Wechselspannung abwechselnd in die eine und wieder in die andere Richtung. Geschieht dies mit ausreichend hoher Frequenz, werden sich die Felder von der Antenne lösen und sich als elektromagnetische Welle in den Raum ausbreiten.

Befindet man sich nun in genügend großer Entfernung zur Antenne, dem Fernfeld, haben sich das elektrische Feld und das magnetische Feld der abgelösten Welle zu einem stabilen Verhältnis „eingependelt“ und man kann von einer sich gleichmässig ausbreitenden, elektromagnetischen Welle ausgehen. Die Frage nach der Entfernung die gegeben sein muss um sich tatsächlich im Fernfeld einer Antenne zu befinden lässt sich nicht allgemein

beantworten und sollte, idealer weise, entsprechenden Tabellen in der Fachliteratur entnommen werden.

Die Polarisierung dieser elektromagnetischen Welle hängt dabei in erster Linie von der Ausrichtung der Antenne relativ zum Horizont ab. [2]

In der Praxis spielen für das erfolgreiche Abstrahlen oder das Empfangen von Energie über eine Antenne noch viele andere Faktoren eine Rolle.

Zum Beispiel die Anpassung, die beschreibt wie gut die Antennenimpedanz und die Impedanz der Zuleitung bei gegebener Frequenz übereinstimmen. Das Verhältnis von Wellenlänge und Antennenlänge oder die Güte und der Gewinn der Antenne.

Da auf dem Versenden von Signalen in dieser Arbeit nicht das Hauptaugenmerk lag hat man sich mit den beiden letzten Begriffen nicht weiter beschäftigt und es soll hier lediglich die Anpassung der Antenne kurz beschrieben werden.

Anpassung:

Die Anpassung der Antenne ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Kabelimpedanz und Antennenimpedanz. Die Impedanz der Antenne ergibt sich wiederum aus ihrem Ersatzschaltbild. Dieses sieht folgendermaßen aus:(Abb.4)

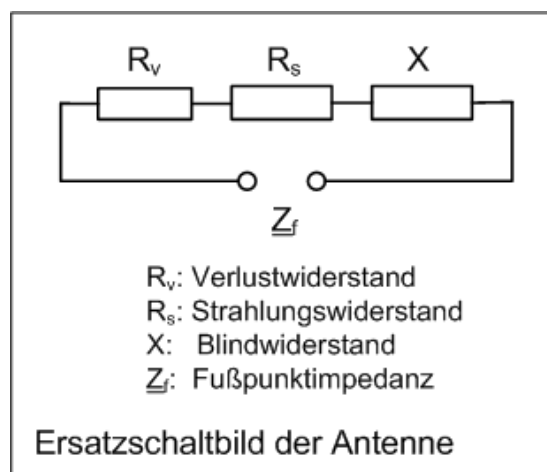


Abb.4 - Ersatzschaltbild Antenne [6]

Und kann unter Zusammenfassung der ohmschen Anteile zu R_a und Auftrennung des Blindanteils in induktive und kapazitive Anteile formuliert werden als:

$$(2.4.1) \quad Z_a = R_a + j \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a} \right)$$

Die Antenne kann also in ihren grundsätzlichen Eigenschaften wie ein Bandpass gesehen werden. An der Resonanzfrequenz heben sich die induktiven und die kapazitiven Blindanteile gegenseitig genau auf und die Antennenimpedanz besteht nur noch aus den ohmschen Anteilen. Sind diese gleich oder sehr ähnlich groß wie die Impedanz des verwendeten Kabels, wird zumindest die gesamte Energie des Signals in Wärme umgesetzt oder idealer weise eben

in den Raum abgestrahlt. Je nachdem ob der Strahlungsanteil oder der Verlustanteil größer ist. Die Antenne ist dann optimal auf die Impedanz der Leitung angepasst.

Unterscheiden sich die ohmschen Anteile von der Impedanz des Kabels wird an der Kontaktstelle ein Teil des Signals reflektiert.

Bei niedrigeren Frequenzen wird ein immer größerer Teil der Spannung über der Kapazität abfallen. Bei höheren über der Induktivität.

Für viele Hochfrequenzanwendungen wird versucht über das gesamte System die Impedanzen auf 50 Ohm anzupassen.

2.6 Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik beschreibt die Abhängigkeit der Signalstärke von der Raumrichtung relativ zu einer Antenne. Bei einer einzelnen linearen Antenne kann, in grober Näherung, davon ausgegangen werden, dass sie in alle Richtungen einer Ebene gleich stark abstrahlt.

Um mit Hilfe von linearen Antennen doch eine Richtwirkung zu erreichen, kann zum Beispiel ein Verbund aus mehreren linearen Antennen, ein Array, in einer Reihe aufgestellt werden. Dieses Array hat anschliessend in Abhängigkeit der Anzahl der Antennen, ihrer Abstände zueinander und der gewählten Arbeitsfrequenz bestimmte Raumrichtungen in denen es zu negativen Interferenzen kommt und andere in denen sich die Signale positiv überlagern.

Die Formel die diesen Zusammenhang für ein gleichphasig betriebenes Antennen-Array beschreibt lautet:[1]

$$(2.5.1) \quad F_{R(\phi)} = \left| \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\delta}{2}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} \right|$$

Wobei n die Anzahl der Antennen im Array beschreibt und $\delta/2$ folgender Formel entspricht:

$$(2.5.2) \quad \frac{\delta}{2} = \pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cos\left(\arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)$$

hierbei ist mit d der Abstand der Antennen untereinander gemeint. Y beschreibt die Entfernung senkrecht zum Array und X die Entfernung vom Mittelpunkt des Arrays parallel dazu.

Grafiken zur Darstellung der Richtcharakteristik sehen zum Beispiel so aus: (die Erläuterungen zu den Grafiken folgen unterhalb der Darstellungen)

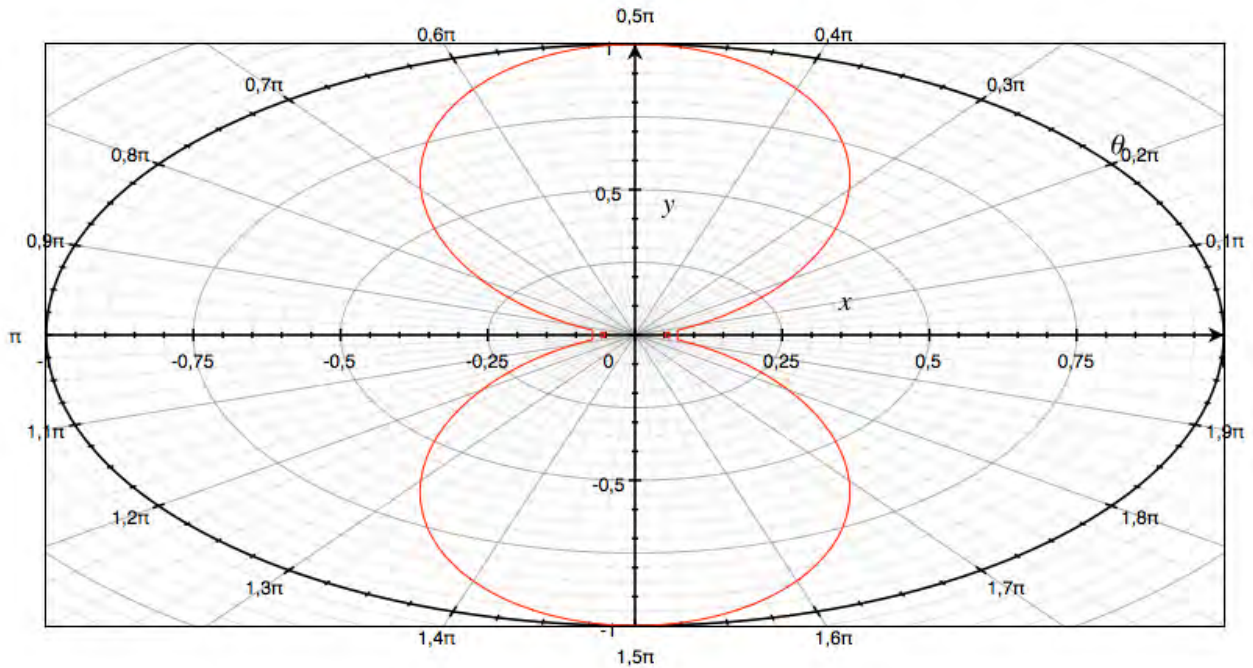


Abb.5 - Richtcharakteristik 2 Antennen

$$F_{R(\phi)} = \left| \frac{\sin\left(\pi \cdot 2 \cdot \frac{4,5}{9,2} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)}{2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{4,5}{9,2} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)} \right|$$

Es handelt sich hierbei also um 2 Antennen, die bei einer Wellenlänge von 9,2 Metern im Abstand von 4,5 Metern aufgestellt wurden.

Eine Erhöhung der Antennenanzahl auf fünf ergibt dann folgende Darstellung:

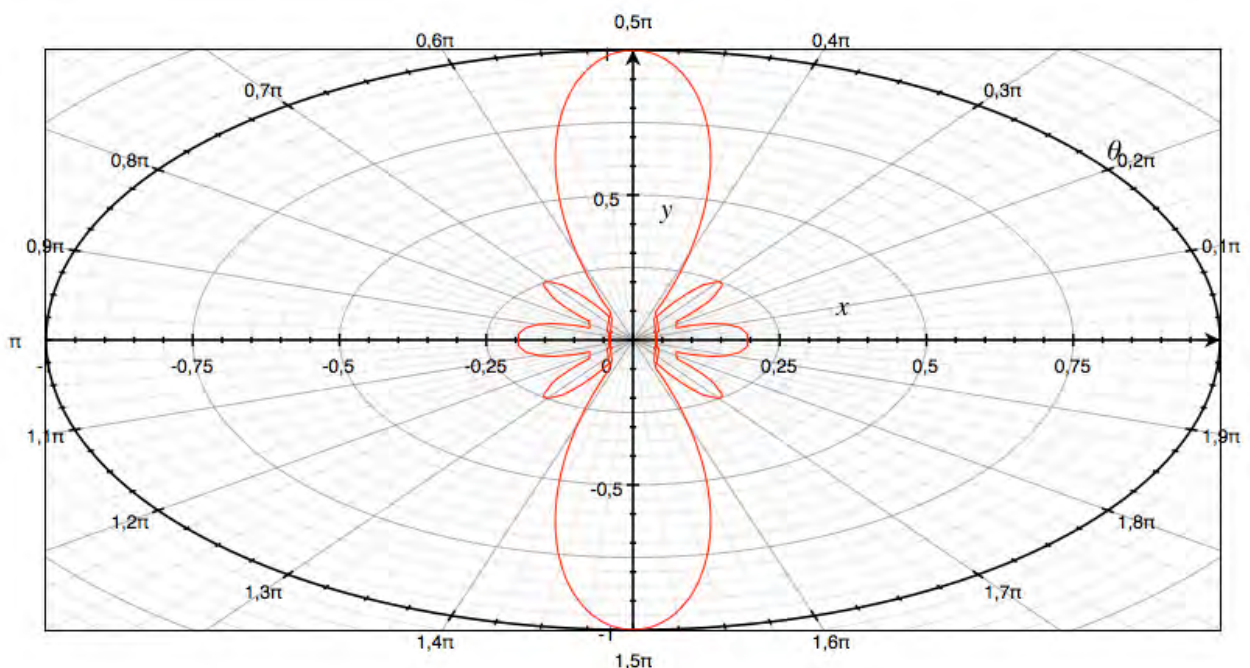


Abb.6 - Richtcharakteristik 5 Antennen

$$F_{R(\phi)} = \left| \frac{\sin\left(\pi \cdot 5 \cdot \frac{4,5}{9,2} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)}{5 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{4,5}{9,2} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)\right)} \right|$$

In den Grafiken entspricht die Entfernung der roten Kurve zum Zentrum der Grafik dem Betrag der relativen Signalstärke bezogen auf das stärkste mögliche Signal in dB.

1 steht also für die maximale Signalstärke. 0 für die minimale.

Die gekennzeichneten Bereiche in denen der Betrag des Signals größer 0 wird werden hierbei als Keulen bezeichnet. Natürlich handelt es sich hier um sehr theoretische Grafiken.

Das Array der zweiten Darstellung weist zwei deutliche Hauptkeulen jeweils senkrecht zum Array und im 180° Winkel zueinander auf. Das Array wird Signale nach hinten und Signale nach vorn gleich stark abstrahlen. Die Breite der Hauptkeulen sowie die Anzahl und Größe der Nebenkeulen ist in erster Linie von der Anzahl der Antennen im Array und ihrem Abstand untereinander abhängig.

Dieser Zusammenhang gilt jedoch so nur dann, wenn alle Antennen gleichphasig betrieben werden. Ist dies nicht der Fall, ist die Folge, dass in oben abgebildeter Grafik die Nebenkeulen größer werden und sich die Ausrichtung der Hauptkeulen relativ zum Antennen Array verschiebt.[1]

2.7 Beam Forming

Der Beam Forming Algorithmus nutzt den im letzten Kapitel beschriebenen Effekt der Signalüberlagerung eines Antennen Array und die daraus resultierende Richtcharakteristik um einen gerichteten Empfang zu simulieren. Dazu werden auf der Grundlage der theoretischen Richtcharakteristik des Arrays die einzelnen empfangenen Signale so addiert, dass sie sich auf die selbe Weise überlagern wie es beim Abstrahlen aufgrund der spezifischen Antennenabstände und Wellenlänge geschehen würde.

In einem bestimmten Rahmen kann dadurch die Empfangscharakteristik des Array geschwenkt werden, indem die Einzel-Signale etwas mehr oder etwas weniger phasenversetzt addiert werden.

Für das Funktionieren des Beam-Forming-Algorithmus ist es entscheidend, dass die Phasengänge der beteiligten Komponenten bekannt sind und dadurch die eintreffenden Signale und ihre Phasenlagen zueinander richtig interpretiert werden.

2.7 Antennentypen

Bei den von Helzel verwendeten Antennen handelt es sich um $\lambda/4$ Monopole. Dies ist eine besondere Form des Halbwellenstrahlers. Ein Halbwellenstrahler ist eine Antenne, deren Länge genau der halben Wellenlänge des zu sendenden Signals entspricht. Halbwellenstrahler werden mittig gespeist und es ergibt sich über den Verlauf der Antenne eine charakteristische Verteilung der Ströme und Spannungen. Wobei die Ströme am Speisepunkt ihr Maximum und an den Enden der Antenne ihr Minimum aufweisen. Für die Spannung gilt genau der umgekehrte Zusammenhang.

Ein $\lambda/4$ Monopol wiederum ist ein halber Halbwellenstrahler der entweder auf einer leitenden Fläche platziert wird oder ein künstliches Gegengewicht in Form von Radials aufweist.

Die Stelle an der der $\lambda/4$ Strahler gespeist wird nennt man dabei den Fußpunkt. Das Gegengewicht bzw. die Radials vervollständigen ihn dann zu einem mittig gespeisten Halbwellenstrahler und es ergibt sich die selbe charakteristische Verteilung von Strom und Spannung entlang der Antenne wie bei einem Halbwellenstrahler.(Abb.7)

Der große Unterschied ist lediglich der Betrag der abgestrahlten Leistung. Dieser entspricht bei einem $\lambda/4$ Monopol nur noch der Hälfte der Leistung die ein Halbwellenstrahler in den Raum abgestrahlt hätte[1].

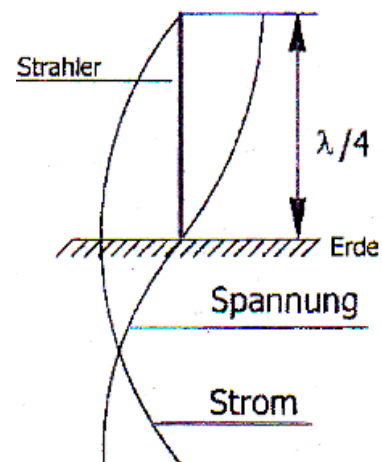


Abb.7 - Potentialverteilung $\lambda/4$ Strahler [7]

$\lambda/4$ Monopole existieren in unterschiedlichen Bauformen.

Helzel verwendet Antennen die am ehesten als Groundplane-Marconi-Antennen-Hybrid beschrieben werden können.

Die Antenne ist deswegen ein Hybrid aus beiden Bauformen weil sie von beiden Antennentypen bestimmte Eigenschaften aufweist. Die Groundplane typischen Eigenschaften wären zum Beispiel die vorhandenen Radials, die im vorliegenden Fall aus drei an der Anpassungsschaltung angebrachten Drahtseilen mit 2mm Durchmesser bestehen und entsprechend der benötigten Modifikationen in bestimmten Abwärts- und relativ Winkeln zueinander auf den Boden abgespannt werden. Sie vervollständigen den restlichen Teil der

Antenne, der zu einem $\lambda/2$ Strahler fehlen würde und geben gleichzeitig die Möglichkeit die Antennencharakteristik entsprechend ihrer Lage zueinander, und zur Antenne, in einem bestimmten Bereich zu beeinflussen.(Abb.8)

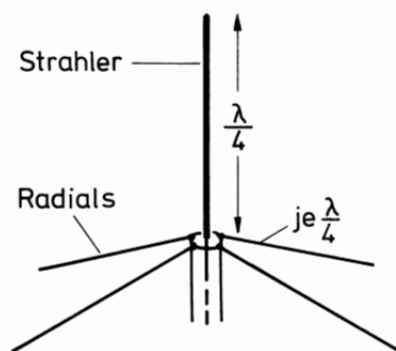


Abb.8 - Skizze Groundplane Antenne [8]

Als Marconi Antennen wiederum werden Antennen bezeichnet, die das unter der Antenne befindliche Erdreich als Vervollständigung des $\lambda/2$ Strahlers ausnutzen. Durch das Abspannen der Radials der Groundplane Bauform in Richtung Erde und den geringen Abstand des Fußpunktes der Antenne zum Erdreich wird auch dieser Effekt von den verwendeten Antennen ausgenutzt. Je nach Einrichtung und Einstellung

der Radials ist die Antenne anschließend eher eine Groundplane- oder eher eine Marconi Antenne.[2]

3 Hardware

3.1 Komponenten

Für alle Messungen wurde das bei Helzel vorhandene Laborsystem verwendet. Dieses besteht aus folgenden 3 Komponenten:

- Power Supply Rack (wird nicht erläutert da irrelevant)
- Receiver Rack
- Frequency Control Rack

Die weiteren verwendeten Komponenten sind:

- AirCell7 Kabel von SSB electronics
- Splitterbox der Firma Helzel
- Antennen der Firma Helzel
- Spectrum Analyzer FSH3 von Rhode&Schwarz

Da die Beschreibung der Hardware nicht Gegenstand dieser Bachelorarbeit ist sollen im nun folgenden Abschnitt nur die für die Auswertung der gemessenen Werte nötigsten Eigenschaften und Funktionen beschrieben werden

3.2 Receiver Rack

Das Receiver Rack besteht aus zwei Hauptkomponenten. Zum einen wäre das der Receiver Input Filter, bestehend aus den N-Stecker Anschlüssen für die Antennenkabel, die auf einen bestimmte Frequenzbereich abgestimmten Bandpassfilter, sowie einigen Relais zum Umschalten der Signalpfade. Außerdem befinden sich hier noch die Richtkoppler, die für Reflexionsmessungen zugeschaltet werden können. Den Richtkopplern wird hierbei, im Falle einer externen Kalibrierung, sowohl das hinlaufende Signal auf direktem Wege zugeschaltet als auch das gesamte Signal auf der Leitung inklusive des reflektierten Anteils. Durch eine Differenzbildung beider Signale liegt anschliessend am Ausgang der Richtkoppler, idealer weise, nur noch das reflektierte Signal an. Dies gilt in dieser Form jedoch nur wenn es nicht zu mehrfach Reflexionen kommt. Im vorliegenden Fall enthält das Signal am Ausgang also auch immer noch die Anteile der mehrfach Reflexionen auf den Leitungen.

Durch das Setzen bestimmter Bit durch den CompactPCI (siehe: Kapitel 3.3)lassen sich hier insgesamt 3 verschiedene Signalwege auswählen. Die folgende Grafik soll das verdeutlichen: (Abb.9)

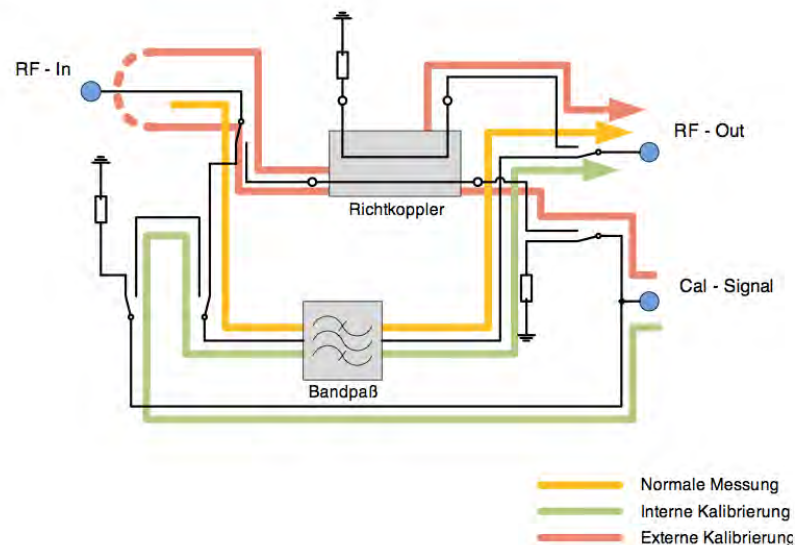


Abb.9 - Signalwege des Receiver Input Filter [4]

An dieser Stelle musste die Hardware modifiziert werden.

Einschub „Modifizierung der Hardware“:

Um zwischen den Signalpfaden umzuschalten werden vom System internen CompactPCI bestimmte Bits gesetzt oder gelöscht. Durch das setzen dieser Bits werden wiederum FlipFlops geschaltet, die mit ihren Ausgangspegeln die nötigen Relais freischalten. Die Programmierung der Bits die für das Schalten der für die externe Kalibrierung nötigen Relais verantwortlich sind wurde noch nicht fertig gestellt. Die nötige Hardware (sprich die FlipFlops und die nötigen Relais) sind aber bereits vorhanden. Um das Setzen des nötigen Bits zu simulieren wurde ein Kippschalter eingelötet.(Abb.10) Dieser Kippschalter wurde nach aussen geführt, so dass nach dem Einstellen der internen Kalibrierung von WERADesk aus (siehe hierzu Kapitel „die Software“) nur noch der Kippschalter umgelegt werden musste um auf externe Kalibrierung und die hierfür nötigen Signalpfade umzuschalten.

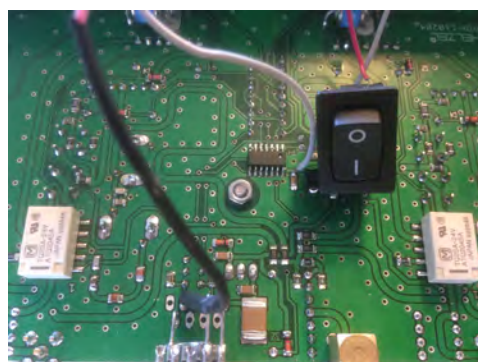


Abb.10 - Filter mit eingelötetem Kippschalter

Die zweite Komponente des Receiver Rack sind die Receiver selbst. In den Receivern wird das empfangene Signal mit Hilfe eines Quadraturmischers ins Basisband gemischt. Im Quadraturmischer wird einmal das LO-Signal und einmal ein um 90° Phasengedrehtes LO Signal mit dem RF Signal multipliziert. Hierbei entsteht ein sogenannter Inphase Anteil(I) und ein Quadraturanteil (Q). Wobei I dem realen Anteil des Signals und Q dem imaginären Anteil entspricht.(Abb.11)

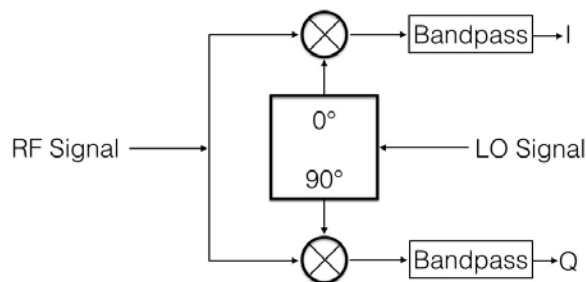


Abb.11 - Skizze Signalwege Quadraturmischung

Aus den dabei an den Ausgängen des Quadraturmischers entstehenden Signalen lässt sich, unter anderem, auf die Phase des Eingangssignals relativ zu Kanal 1 schließen.

Dahinter steht folgende Theorie:

Das RF Signal kann beschrieben werden als:

$$(3.2.1) \quad U_{RF(t)} = U_{RF_{\max}} \sin(\omega_{RF} \cdot t + \phi)$$

Und das LO Signal als:

$$(3.2.2) \quad U_{LO(t)} = U_{LO_{\max}} \sin(\omega_{LO} \cdot t)$$

bzw. nach Drehung um 90°:

$$(3.2.3) \quad U_{LO(t)} = U_{LO_{\max}} \cos(\omega_{LO} \cdot t)$$

Nach Multiplikation der Signale ergibt sich für I bzw. Q:

$$(3.2.4) \quad I_{(t)} = \frac{U_{RF_{\max}} \cdot U_{LO_{\max}}}{2} \cdot (\cos(t \cdot (\omega_{RF} - \omega_{LO}) + \phi) - \cos(t \cdot (\omega_{RF} + \omega_{LO}) + \phi))$$

$$(3.2.5) \quad Q_{(t)} = \frac{U_{RF_{\max}} \cdot U_{LO_{\max}}}{2} \cdot (\sin(t \cdot (\omega_{RF} - \omega_{LO}) + \phi) + \sin(t \cdot (\omega_{RF} + \omega_{LO}) + \phi))$$

Durch die anschließenden Filter werden die hohen Frequenzen dieser Anteile unterdrückt und die I bzw Q Anteile bestehen nur noch aus den niederen Frequenzen, die sich durch die Differenzbildung der beiden Kreisfrequenzen ergeben.

Setzt man diese beiden Anteile durch Addition zu einem komplexen Zeiger zusammen ergibt sich zunächst folgende Darstellung:

$$(3.2.6) \quad I_{(t)} + j \cdot Q_{(t)} = \frac{U_{RFMax} \cdot U_{LOMax}}{2} \cdot (\cos(t \cdot (\omega_{RF} - \omega_{LO}) + \phi) + j \cdot \sin(t \cdot (\omega_{RF} - \omega_{LO}) + \phi))$$

und nach Umwandlung in die Eulersche Form:

$$(3.2.7) \quad I_{(t)} + j \cdot Q_{(t)} = \frac{U_{RFMax} \cdot U_{LOMax}}{2} \cdot e^{j(t \cdot (\omega_{RF} - \omega_{LO}) + \phi)}$$

Was einem komplexen Zeiger entspricht, welcher sich, mit der Differenz der beiden Kreisfrequenzen, um den Ursprung dreht.

So kann auch der relative Phasenunterschied zwischen den Kanälen bestimmt werden, da, unter der Voraussetzung, dass an jedem Kanal die selbe Frequenz ankommt, sich die Zeiger jedes Kanals zwar mit der selben Geschwindigkeit drehen, ihre Lagen sich jedoch aufgrund der jeweiligen Phasenwerte unterscheiden.

Im Falle einer internen- bzw. externen Kalibrierung wird als LO ein Signal mit Frequenzoffset auf den Quadraturmischer gegeben. Würde man an dieser Stelle genauso wie beim Empfangen eines Signals vorgehen, wäre das Ergebnis eine reine Gleichspannung, da sich für die Differenz der Kreisfrequenzen stets Null ergäbe. Diese könnte jedoch die anschließenden Filter nicht passieren[4].

3.3 Frequency Control Rack

Im Frequency Control Rack sind alle digitalen Komponenten des WERA Messsystems untergebracht. Dies sind zum einen der CompactPCI der als Messrechner und Schnittstelle zwischen dem Steuerrechner und dem WERA System dient. Zum anderen alle nötigen ADC sowie die nötigen Bauteile zur Signalerzeugung und der RF Treiber. Die ADC dienen hier zur Umwandlung der Signale hinter dem Quadraturmischer in digitale Werte die anschließend vom CompactPCI weiter verarbeitet werden können. Dies geschieht auf folgendem Weg:

Entsprechend der in WERADesk eingestellten Mess- und Sweepdauer wird das am I- bzw. am Q Ausgang anliegende Signal abgetastet. Im Anschluss wird durch die hierbei entstanden Einzelwerte eine Fitkurve entsprechend der wiederum in WERADesk gewählten Rx Offset Frequenz gelegt. Dabei wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate angewendet.

Der CompactPCI versucht also aus den einzelnen erhaltenen Messpunkten die Kurve zu generieren, die er entsprechend der Einstellungen in WERADesk an den Ausgängen des Quadraturmischers erwartet. Dies geschieht für alle Kanäle gleichzeitig so das die Kurven der einzelnen Kanäle jeweils mit dem Kanal 1 verglichen werden und eine Aussage über die Phasenlagen relativ zu Kanal 1 getroffen werden kann. Die Phaseninformation ist hierbei, laut einem Telefongespräch mit Dr. Klaus Werner Gurgel an der TU Hamburg Harburg je nach Signal-Rausch Verhältnis auf bis zu 2° genau.[5]

3.4 AirCell©7 Kabel

Das AirCell©7 ist ein Koaxialkabel mit sehr guten Eigenschaften für die Hochfrequenztechnik. Im besonderen zu erwähnen ist der sehr gute Verkürzungsfaktor von ca. 0,83. Dieser wird erreicht, indem als Dielektrikum zwischen Innen- und Aussenleiter ein PE-Compound mit einem Gasanteil von bis zu 70% benutzt wird. Durch den hohen Gasanteil nähert sich die Permittivität sehr nahe an die der Luft an. Desweiteren weist es eine sehr gute Anpassung an die benötigten 50 Ohm Impedanz auf, hat eine geringe Dämpfung und ist sehr flexibel.(Abb.12)

[Datenblatt: siehe Anhang Kapitel 8.1]



Abb.12 - Aircell©7 Kabel mit Kabeltrommeln

3.5 Splitterbox

Die Splitterbox(Abb.13) der Firma Helzel dient dem Durchführen von Kalibriermessungen beim Einrichten eines WERA Messsystems. Es besteht aus einem zentral angebrachten N-Stecker Anschluss für das Tx Signal und 16 im Kreis um den Tx angeordneten N-Stecker Anschlüssen an die die Rx Eingänge mit den entsprechenden Kabeln angeschlossen werden können. Im inneren wird das Signal vom Tx möglichst gleichmäßig auf alle Ausgänge der Splitterbox verteilt.

Die Splitterbox dämpft das Signal hierbei um 50 dB.



Abb.13 - Splitterbox der Firma Helzel

3.6 Antennen

Die Antennen bestehen aus einem hohlen, 50 mm Durchmesser Aluminiumrohr mit aufgesetzter Kunststoffschutzkappe, welches mithilfe von Kunststoffhaltern aus dem Camping- und Outdoorbedarf an ein handelsübliches Vierkantholz angebracht wird. Die Länge des Rohrs ist dabei abhängig von der Frequenz mit der das jeweilige System arbeiten wird. Am unteren Teil des Vierkantholzes ist, ebenfalls mit den bereits erwähnten Kunststoffhaltern, eine weitere Stange befestigt mit der die Antennenkonstruktion im Boden verankert werden kann(Abb.16). Zur Anpassung des Aluminium Rohrs an die Impedanz der Zuleitung und die benötigte Frequenz wird am unteren Teil eine Anpassungsschaltung angesetzt die aus einer Reihen-Kapazität zum Isolieren gegen Gleichspannungen von der Systemseite her, einer großen Parallel-Induktivität zum Ableiten antennenseitiger Gleichspannung, sowie einer einstellbaren Reihen-Induktivität zum anpassen der Resonanzfrequenz der Antenne besteht.

Bei der Reihen-Induktivität handelt es sich um eine Spule mit Ferritkern, dessen Eintauchtiefe von außen verstellt werden kann.

Es ergibt sich folgendes Ersatzschaltbild:(L_a und die einstellbare Induktivität wurden hier zusammen gefasst)

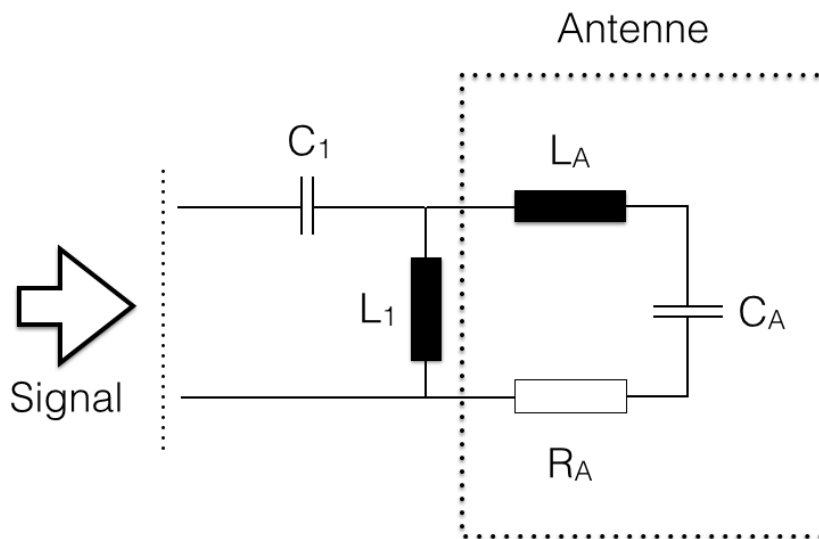


Abb.14 - ESB Antenne mit Anpassungsschaltung

Die Anpassungsschaltung ist zum Schutz gegen Wettereinflüsse in ein Kunststoffgehäuse gebettet(Abb.15). Am unteren Teil dieses Kunststoffgehäuses befinden sich die Anschlüsse für die drei Radials und ein N-Stecker zum Anschluss der Kabel.

Der Innenleiter des angeschlossenen Kabels wird von hier aus auf die Anpassungsschaltung geführt. Der Außenleiter wird mit den Radials verbunden.

Da es sich um einen $\lambda/4$ Monopol handelt, der als Vervollständigung zum $\lambda/2$ Strahler das Gegengewicht in Form der Radials oder das Erdreich benutzt, handelt es sich also um eine Mitten-gespeiste Antenne.

Der Bauplan der aktuellen Anpassungsschaltung befindet sich im Anhang dieser Arbeit(Kapitel 8.2).



Abb.15 - Anpassungsschaltung mit Kunststoffgehäuse



Abb.16 - Aufgebaute Antenne

3.7 Spectrum Analyzer

Der Spectrum Analyzer FSH3 von Rhode&Schwarz (Abb.17) wurde verwendet um die Antennen einzurichten. Mit seiner Hilfe kann die Resonanzfrequenz einer Antenne bestimmt werden.

Zum Einrichten der Antennen wurde der FSH3 im Menu „Measure“ auf Reflektionsmessung eingestellt. Um diese durchzuführen wird an Aus- und Eingang des Geräts ein Richtkoppler angeschlossen, der sowohl das direkte Signal, welches vom FSH3 erzeugt wird, als auch das reflektierte Signal empfängt. Aus den Verhältnissen beider Signale kann dann eine Aussage über das SWR im gewählten Frequenzbereich getroffen werden. Der Verlauf des gemessenen SWR wird dabei auf dem Display des FSH3 grafisch dargestellt.

Vor der Messung muss dann noch ein gewünschter Frequenzbereich eingestellt und das Anschlusskabel, welches zur Antenne führt, kalibriert werden.

Das Kalibrieren der Kabel läuft dabei im Verlauf von 3 Messungen. Diese werden einmal an einem offenen, einmal an einem kurzgeschlossenen und einmal an einem, mit 50 Ohm Last abgeschlossenen Kabel durchgeführt.

Die Messungen dienen dazu, den Phasengang und den Wellenwiderstand der verwendeten Leitung kennenzulernen. So müsste zum einen bei intaktem Kabel der Phasengang des offenen Kabels immer genau 180° kleiner sein als der des kurzgeschlossenen Kabels. Zum anderen sollte das SWR beim abschließen des Kabels mit einem 50 Ohm Widerstand sehr klein sein oder idealerweise gegen 0 gehen.

Hat man die Kalibrierung des jeweiligen Kabels abgeschlossen, kann die Antenne an das Gerät angeschlossen und auf dem Display diejenige Stelle gesucht werden bei der das SWR im gewählten Frequenzbereich sein lokales Minimum aufweist. Diese Frequenz ist die Resonanzfrequenz der Antenne im gewählten Bereich. Aus der Höhe des SWR an dieser Stelle können dann auch Rückschlüsse auf die Anpassung an der Resonanzfrequenz getroffen werden.



Abb.17 - FSH3 von Rhode&Schwarz

4 Software

4.1 Oberflächen

Der CompactPCI des WERA Messsystem ist über eine Ethernet Verbindung mit einem Steuerrechner verbunden von dem aus alle Einstellungen und Befehle an den CompactPCI gesendet werden können. In der Regel geschieht das über die, in HTML programmierte, grafische Oberfläche WERADesk. Außerdem werden alle erhaltenen Messdaten auf der Festplatte des Steuerrechners abgespeichert.

Beide Rechner, sowohl der CompactPCI als auch der Steuerrechner laufen hierbei unter Linux.

Für diese Arbeit wurde als Steuerrechner ein Laptop eingesetzt.

Die WERADesk Oberfläche sieht folgendermaßen aus:(Abb.18)

The screenshot shows the 'WeraDesk at Taiwan1' web interface. It is organized into several sections with various input fields, dropdown menus, and checkboxes. The 'Acquisition Mode' is set to 'Internal Calibration'. Under 'Process after Measurement', 'Sea Echos' and 'Calibr. Data' are checked. The 'Time Slot' is 'Master'. 'Receiver Attenuation' and 'FMICW Mode' are both set to 'off'. 'Calibration Power' is '000' dB. The 'Location' is 'Taiwan1'. 'True North' is '349' degrees. 'Latitude' is '54' degrees '7.18' 'N'. 'Longitude' is '8' degrees '51.47' 'E'. 'Time Code' is 'UTC'. 'Cont. Acq. Start Time' is '27' minutes. 'Use CPC1 crontab' is unchecked. 'Freq. Management(1)' and '(2)' are both '40.175 to 42.175' MHz. 'Prescan' and 'Adapt Frequency' are checked. 'Bandwidth Reduction' is '1500 m [100.0 kHz]'. 'Working Frequency' is '32.500' MHz. 'Cycle Repetition Time' is '04' minutes. 'Range Cell Depth' is '1500 m [100.0 kHz]'. 'Number of Range Cells' is '100'. 'Samples per Data Run' is '32'. 'Maximum Range' is '150' km. 'Chirp Length@Clk90' is '0.260028' seconds. 'Data Acquisition Time' is '0 : 08' minutes:seconds. 'Range Offset' is '500' meters. 'RX Offset@Clk90' is '80.0Hz'. The 'Data Path' is '/home/wera/data/CubicCal/'. 'File Location ID' is 'tw1'. The 'Comment' field contains 'FAT Kaki'. At the bottom, there are 'Submit' and 'Reset' buttons, a 'Clock' set to '90.0' MHz, and the version 'Vers. 3.0.5b HZM'.

Abb.18 - WERADesk graphical user interface

Hier kann zum einen über „Acquisition Mode“ zwischen interner und externer Kalibrierung umgeschaltet werden.

Zum anderen stellt man über diese Oberfläche die zu verwendende Arbeitsfrequenz („Working Frequency“) und die Messdauer („Samples per Data Run“) ein.

Die weiteren Funktionen sind für die Kalibriermessungen nicht von Bedeutung.

Die Einstellung „Samples per Data Run“ gibt dabei an wie oft hintereinander das Signal entsprechend der „Chirp Length@Clk90“ abgetastet werden soll. Die Abtastrate beträgt fest ca. 6 kHz.

Mit den oben zu sehenden Einstellungen würde der CompactPCI das Signal an den I und Q Ausgängen des Quadraturmischers also 32 mal hintereinander jeweils für 0,260028 Sekunden mit einer Abtastrate von 6 kHz Messen und aus diesen Werten die jeweilige Signal Kurve generieren.

Nachdem in WERADesk alle Einstellungen vorgenommen wurden, werden durch das Drücken des „Submit“ Button alle nötigen Einstellungen zunächst in die Datei „ctrl_data.cpy“ übertragen und von dort in die Header der zu erzeugenden .CAL Files geschrieben und an den CompactPCI weitergereicht.

Im laufenden Betrieb würde hier eigentlich ein Modus gewählt, der eine kontinuierliche Messung durchführt und die Ergebnisse dieser Messungen in das, in WERADesk definierte Dateiverzeichnis hinterlegt. Dies war für die Kalibriermessungen nicht möglich. Um jedoch dennoch zu vermeiden, dass der „Submit“ Button immer wieder gedrückt werden muss wurde eine Software in Xojo© geschrieben, die diese Aufgabe für den Benutzer übernehmen kann. (Abb.19)

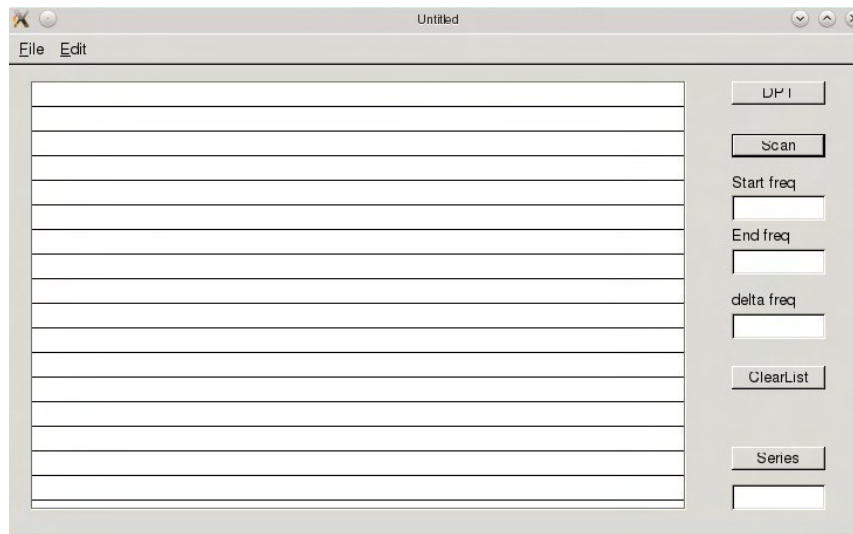


Abb.19 - Messsoftware graphical user interface

Hier hat der Benutzer die Möglichkeit entweder eine Start- und Endfrequenz sowie eine Schrittweite einzustellen (alle Eingaben in MHz) oder eine vorher definierte Anzahl Messungen bei konstanter Frequenz durchzuführen.

Außerdem kann man sich mit ihrer Hilfe das Erzeugen von LibreOffice Sheets erleichtern.

Diese Software musste optisch nicht ansprechend sein, da sie nur für den Zweck dieser Arbeit benutzt werden sollte.

4.2 Hintergrund Prozesse

4.2.1 Messsoftware

Durch das Drücken des „Submit“ Button wird der Shell Befehl:

```
/home/wera/weractrl/stm /home/wera/etc/ctrl_data.cpy /home/wera/weractrl/cron_hawaii s
```

ausgeführt.

Es wurde also ein Loop mit einer synchronen Shell geschrieben, der so oft durchlaufen wird wie der Benutzer im Feld unter dem Button „Series“ eingegeben hat und immer wieder oben beschriebenen Befehl aufruft.

Um einen Scan durchführen zu können musste dann eine Methode geschrieben werden die in der bereits erwähnten ctrl_data.cpy die aktuelle Arbeitsfrequenz durch die nächste Frequenz die sich durch Addition der Schrittweite auf die aktuelle Frequenz ergibt ersetzt. Diese Information befindet sich immer an der selben Stelle der Datei ctrl_data.cpy.

Es konnte also über einen Binary Stream genau diese Zahl ersetzt und anschließend wieder das „stm“ Programm aufgerufen werden.

Eine weitere Funktion die die selbst geschriebene Messsoftware mitbringt ist die Möglichkeit, die erzeugten .TXT files mittels Drag&Drop in die ListBox zu legen und anschließend alle Messwerte durch drücken des DPT Button Antennen-diskret in neue .TXT files einzureihen, die dann ganz einfach, mittels der .csv Import Funktion von LibreOffice, in ein Tabellen Sheet übertragen werden können.

Hierzu ein Beispiel:

Der Inhalt einer .TXT Datei die nach einer Messung erzeugt wird sieht aus wie folgt:

```
Plott_WERA_Cal_lsq V1.2.5 Linux:
Processing file: /home/wera/data/TEST_Taiwan1_2/20140561340_tw1_15.CAL
FREQ      = 10.80000 MHz
t_sweep   = 0.26000 s
mt        = 1536 samples
nfft      = 32 samples
nant      = 4 antennas
DDS_Clock = 181.484308 MHz
i_offset  = 124076836 DDS steps
f_offset  = -80.00000 Hz
f_center  = -80.00000 Hz
Antenna:  DC values [V]:      RMS values: [V]      Cal values:
1         -0.00139  0.00186  0.17601  0.17933  3.80773  3.73712
2         -0.00043  0.00600  0.52947  0.54253  1.26576  1.23529
3          0.00287  0.00076  0.62541  0.64463  1.07159  1.03963
4          0.00641  0.00969  0.65434  0.67018  1.02422  1.00000
Antenna:  Freq.:  Phase:  Peak-1  Peak  Peak+1  LSQ  I/Q-Balance
1         -80.04808      0.000  0.000  0.000  0.000  0.00  86.11
2         -80.04808     -88.786 -88.786 -88.787 -88.79 86.32
3         -80.04808    -126.780 -126.780 -126.780 -126.78 86.98
4         -80.04808    -125.628 -125.628 -125.628 -125.63 86.43
Calibration data in /home/wera/data/TEST_Taiwan1_2/20140561340_tw1_15.CAL.amphase
To activate this calibration, please execute the command:
> cp /home/wera/data/TEST_Taiwan1_2/20140561340_tw1_15.CAL.amphase ~/etc/calibration.wera
```

Abb.20 Ausgabe .TXT File

Diese Datei enthält also für jede Antenne die Ergebnisse bezüglich Phase und RMS Wert der aktuellen Messung. Wollte man also zehn Messungen in ein Tabellen-Sheet übertragen müsste man zehn solcher Dateien öffnen und die benötigten Werte herausschreiben.

Dies lässt sich durch die Funktion DPT vermeiden.

Sie gibt dem Benutzer die Möglichkeit alle zehn .TXT Files in die Listbox zu draggen und über einen Klick auf den genannten Button in unserem Beispiel 8 .TXT files zu erzeugen die jeweils nur die Messwerte jeder einzelnen Antenne enthält.

Eine dieser Dateien würde dann folgendermassen aussehen:

10.80000	0.52914	0.54203	1.26543	1.23533	-88.792	86.31
10.80000	0.52947	0.54253	1.26576	1.23529	-88.786	86.32
10.80000	0.52937	0.54240	1.26570	1.23531	-88.790	86.32
10.80000	0.52867	0.54139	1.26505	1.23532	-88.794	86.31
10.80000	0.52901	0.54183	1.26529	1.23534	-88.790	86.31
10.80000	0.52891	0.54170	1.26519	1.23532	-88.791	86.31
10.80000	0.52884	0.54160	1.26514	1.23533	-88.792	86.31
10.80000	0.52877	0.54152	1.26511	1.23533	-88.791	86.31
10.80000	0.52871	0.54144	1.26508	1.23532	-88.792	86.31
10.80000	0.52863	0.54135	1.26506	1.23533	-88.792	86.30

Abb.21 Ausgabe nach DPT

und kann so in LibreOffice importiert werden.

Die erste Spalte beschreibt hierbei immer die aktuelle Frequenz in MHz, die zweite Spalte die RMS Werte des jeweiligen Kanals und die vorletzte Spalte die gemessene Phasendifferenz zwischen dem aktuellen Kanal und Kanal1. In der letzten Spalte wird der Phasenversatz zwischen den I und Q Ausgängen des Quadraturmischer angezeigt.

Ist dieser nicht nahe bei 90° handelt es sich um eine Fehlmessung.

Ebenso sollten die RMS Werte des Kanals kleiner als 7 V bleiben, um das System nicht zu übersteuern.

Die anderen Werte sind für das Thema dieser Arbeit nicht relevant und werden deswegen nicht weiter erläutert.

Eine Zeile in dieser Datei entspricht immer dem Ergebnis von einem Messdurchgang.

Die DPT Funktion war in anderer Form bereits bei Helzel vorhanden. Sie musste nur etwas modifiziert und in die Messsoftware eingebunden werden. Die Änderung bezog sich lediglich auf die erste Reihe, in der normalerweise nicht die aktuelle Frequenz sondern das Datum der Messung stehen würde.

Alle weiteren Einstellungen bleiben über alle Messungen konstant und wurden deswegen weiterhin über WERADesk angewählt.

4.2.2 Automatischer Shell Prozess

Zusätzlich war eine Änderung an einem der Shell-Skripte des WERA Systems nötig.

Um dem WERA System Benutzer die Arbeit mit dem Messsystem einfach zu machen wird nach jeder vollendeten Messung das Shell Skript `process_Cal.sh` aufgerufen. Dieses Skript wandelt mit Hilfe des Fortran Programms „`Plott_Wera_Cal_Isq`“ die aktuell anfallende `.CAL` Datei direkt in ein `.TXT` file, ein `.amphase` file und für jede Antenne ein `.GIF` File um.

(Das Dateiformat „`.amphase`“ ist eine WERA System spezifische Textdatei, deren Inhalt nach erfolgter Kalibrierung in die Datei „`Calibration.wera`“ übertragen werden kann um ihn so dem System für zukünftige Messungen zur Verfügung zu stellen.)

Die `.TXT` files enthalten dabei die Informationen in geschriebener Form für die jeweilige Messung.

Die `.GIF` Files enthalten die grafische Auswertung dieser Messwerte.

Für die vorliegende Arbeit war es jedoch nicht nötig für jede Antenne ein `.GIF` File zu erzeugen.

Des Weiteren benennt dieses Shell Skript die anfallenden Dateien nach Jahr, Monat, Tag, Stunde und Minute.

Die selbst geschriebene „Messsoftware“ liefert aber mehr als ein Ergebnis pro Minute. Die Messung die bereits durchgeführt wurde und in der selben Minute statt gefunden hat würde also wieder überschrieben.

Die Datei `process_Cal.sh` wurde also so umgeschrieben, dass zum einen zusätzlich zu der bereits bestehenden Benennung der Dateien noch die aktuelle Sekunde mit an den Namen angehängt wurde und zum anderen lediglich die `.TXT` files und `.amphase` files erzeugt werden. Jedoch nicht die `.GIF` files.

5. Messungen

5.1 Systemspezifische Bedingungen

Die ersten Messungen wurden im Labor durchgeführt und dienten lediglich dazu das Messsystem und sein Verhalten kennen zu lernen.

Zunächst wurde hierbei untersucht inwiefern sich die Messergebnisse der Reflexionsmessungen am offenen Kabel bei verschiedenen Messdauern verhalten. Dabei wurde festgestellt, dass die gemessenen Phasenwerte bereits bei der kleinsten wählbaren Messdauer verlässlich sind.

Eine Messung dieser Art dauert 8 Sekunden. Es war als mit tragbarem Zeitaufwand bei Messungen auf konstanter Frequenz möglich 10 Messungen hintereinander durchzuführen um einen Überblick über zufällige Fehler zu bekommen.

Anschließend wurde untersucht wie groß die Frequenzschritte bei den Messungen über einen Frequenzbereich sein müssen um hierbei eine ausreichend gute Genauigkeit zu erreichen.

Um dies zu untersuchen wurde die bereits in Kapitel 2.4 beschriebene Methode der Kabellängenbestimmung durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass bei Messungen in Schritten von 10 kHz ein guter Kompromiss zwischen Messdauer und ausreichend hoher Genauigkeit erreicht ist. Und, im Falle eines 200 Meter Kabels, Aussagen über die Kabellängen auf bis zu 2 bis 4 Meter genau getroffen werden können.

- Dies allerdings unter der Voraussetzung, dass der Verkürzungsfaktor als sehr genau angenommen werden kann. Ein Telefongespräch mit der Firma SSB electronic ergab jedoch, dass dieser maximal ein Richtwert ist und produktionsbedingt auch Schwankungen unterliegt. Die Höhe dieser Schwankungen wurden leider nicht genannt -

Im Verlauf dieser Messungen wurde auch festgestellt, dass die verwendeten Kabel mindestens so lang sein müssen wie $5/4$ Wellenlängen der niedrigsten verwendeten Frequenz auf dem Kabel um verlässliche Werte und einen charakteristischen Verlauf der Überlagerungen mit Maxima und Minima zu erhalten. Bei kürzeren Kabeln sind die Mehrfachreflexionen auf der Leitung so dominant, dass hieraus ein beinahe konstanter Pegel über den gesamten untersuchten Frequenzbereich resultiert.

Da die in der Praxis verwendeten Kabel meistens über 100 Meter lang sind, stellt dies aber kein Problem dar.

5.2 Kabelkalibrierung

5.2.1 Experimentelle Randbedingungen

Die Phasenwerte die vom WERA Messsystem angezeigt werden sind immer relativ zu Kanal1 zu sehen. Der Wert den man vom System erhält besteht also immer aus der Differenz

$$\Phi_1 - \Phi_n$$

Wobei n die Nummer des jeweiligen Kanals beschreibt. Aus dieser Information lassen sich natürlich keine absoluten Werte ermitteln. Allerdings kann man die Differenzen der einzelnen Komponenten herausbekommen.

Ja nachdem um welche Art der Messung es sich handelt bestehen die einzelnen Komponenten dieser Differenz aus mehreren Phasengängen.

Kalibrieren mit Hilfe der Splitterbox:

Im Fall einer Transmissionsmessung über die Splitterbox enthält Φ_1 zum Beispiel die Phasenwerte:

$$(5.2.1) \quad \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(SplitterKanalA)} + \Phi_{(Kabel1)} + \Phi_{(Kanal1)} = \Phi_1$$

und Φ_2 die Phasenwerte:

$$(5.2.2) \quad \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(SplitterKanalB)} + \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal2)} = \Phi_2$$

bildet man aus diesen beiden Werten die Differenz erhält man den Ausdruck:

$$(5.2.3) \quad a_1 = \Phi_1 - \Phi_2$$

$$\Rightarrow a_1 = \Phi_{(SplitterKanalA)} - \Phi_{(SplitterKanalB)} + \Phi_{(Kabel1)} - \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal1)} - \Phi_{(Kanal2)}$$

Die Phase der Tx Leitung subtrahiert sich aus dieser Rechnung heraus, da sie sich auf beide Kanäle in gleicher Weise hinzu addiert.

Mit dieser Information kann man also nun durch Tauschen der Anschlüsse, beziehungsweise Kabel, jede einzelne Komponente des Phasenwertes für sich heraus gerechnet werden.

Wenn wir zunächst oben erwähnte Messung durchführen und anschließend die Anschlüsse der Kabel an der Splitterbox vertauschen und noch einmal dieselbe Messung durchführen, bekommen wir einmal den oben bereits beschriebenen Ausdruck a_1 und beim zweiten Mal folgenden Ausdruck:

$$(5.2.4) \quad \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(SplitterKanalA)} + \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal2)} = \Phi_{22}$$

$$(5.2.5) \quad \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(SplitterKanalB)} + \Phi_{(Kabel1)} + \Phi_{(Kanal1)} = \Phi_{12}$$

$$(5.2.5) \quad a_2 = \phi_{12} - \phi_{22}$$

$$a_2 = \phi_{(\text{SplitterKanalB})} - \phi_{(\text{SplitterKanalA})} + \phi_{(\text{Kabel1})} - \phi_{(\text{Kabel2})} + \phi_{(\text{Kanal1})} - \phi_{(\text{Kanal2})}$$

bildet man nun die Differenz aus a_1 und a_2 so erhält man

$$(5.2.6) \quad a_1 - a_2 = 2(\phi_{(\text{SplitterKanalA})} - \phi_{(\text{SplitterKanalB})})$$

Die Hälfte dieser Differenz entspricht also dem Phasenunterschied der zwischen den beiden Splitterbox-Kanälen besteht.

Auf die selbe Weise lassen sich auch die Kabel und die Kanäle einzeln heraus rechnen.

Im Fall der Kabel müssen diese lediglich sowohl an der Splitterbox als auch am System getauscht werden.

Es ergibt sich folgender Zusammenhang: (a_1 wird hierbei immer wieder durch den selben Ausdruck beschrieben)

$$(5.2.7) \quad \phi_{(\text{Tx})} + \phi_{(\text{SplitterKanalA})} + \phi_{(\text{Kabel2})} + \phi_{(\text{Kanal1})} = \phi_{13}$$

$$(5.2.8) \quad \phi_{(\text{Tx})} + \phi_{(\text{SplitterKanalB})} + \phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal2})} = \phi_{23}$$

$$(5.2.9) \quad a_3 = \phi_{13} - \phi_{23}$$

$$a_3 = \phi_{(\text{SplitterKanalA})} - \phi_{(\text{SplitterKanalB})} + \phi_{(\text{Kabel2})} - \phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal1})} - \phi_{(\text{Kanal2})}$$

$$(5.2.10) \quad a_1 - a_3 = 2(\phi_{(\text{Kabel1})} - \phi_{(\text{Kabel2})})$$

Beim Tauschen der Kabel am System hat man dementsprechend die Möglichkeit die Phasenunterschiede der Kanäle zu bestimmen. Allerdings muss hier die Summe und nicht die Differenz gebildet werden.

$$(5.2.11) \quad \phi_{(\text{Tx})} + \phi_{(\text{SplitterKanalA})} + \phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal2})} = \phi_{24}$$

$$(5.2.12) \quad \phi_{(\text{Tx})} + \phi_{(\text{SplitterKanalB})} + \phi_{(\text{Kabel2})} + \phi_{(\text{Kanal1})} = \phi_{14}$$

$$(5.2.13) \quad a_4 = \phi_{14} - \phi_{24}$$

$$a_4 = \phi_{(\text{SplitterKanalB})} - \phi_{(\text{SplitterKanalA})} + \phi_{(\text{Kabel2})} - \phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal1})} - \phi_{(\text{Kanal2})}$$

$$(5.2.14) \quad a_1 + a_4 = 2(\phi_{(\text{Kanal1})} - \phi_{(\text{Kanal2})})$$

Man kann also festhalten, dass man durch das Tauschen der Kabel an bestimmten Stellen innerhalb des Signalweges für bestimmte Teile der angezeigten Phasendifferenz einen Vorzeichenwechsel verursacht und dadurch, mittels Differenz- oder Summenbildung, Rückschlüsse auf die einzelnen Anteile gezogen werden können. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass der heraus gerechnete Teil bedingt durch die Rechenoperation immer mit dem Faktor 2 multipliziert wird und die Differenz oder Summe jeweils halbiert werden muss um die tatsächlichen Werte zu erhalten.

Kalibrieren über eine Reflexionsmessung:

Oben beschriebener Zusammenhang der Messwerte lässt sich dann ebenso für die Reflexionsmessungen herleiten.

Für die Kabel ergibt sich dabei folgender Zusammenhang:

$$(5.2.15) \quad 2\phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal1r})} = \phi_{r1}$$

$$(5.2.16) \quad 2\phi_{(\text{Kabel2})} + \phi_{(\text{Kanal2r})} = \phi_{r2}$$

$$(5.2.17) \quad a_{r1} = \phi_{r1} - \phi_{r2}$$

$$a_{r1} = 2\phi_{(\text{Kabel1})} - 2\phi_{(\text{Kabel2})} + \phi_{(\text{Kanal1r})} - \phi_{(\text{Kanal2r})}$$

und nach tauschen der Kabel:

$$(5.2.18) \quad 2\phi_{(\text{Kabel2})} + \phi_{(\text{Kanal1r})} = \phi_{r12}$$

$$(5.2.19) \quad 2\phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal2r})} = \phi_{r22}$$

$$(5.2.20) \quad a_{r2} = \phi_{r12} - \phi_{r22}$$

$$a_{r2} = 2\phi_{(\text{Kabel2})} - 2\phi_{(\text{Kabel1})} + \phi_{(\text{Kanal1r})} - \phi_{(\text{Kanal2r})}$$

$$(5.2.21) \quad a_{r1} - a_{r2} = 4(\phi_{(\text{Kabel1})} - \phi_{(\text{Kabel2})})$$

Der aus der Rechenoperation resultierende Wert entspricht also dem vierfachen Phasenunterschied zwischen den beiden Kabeln.

Die Werte die sich hierbei für die Kanäle ergeben sind irrelevant, da bei der Reflexionsmessung an den Kabel die Bandpässe der Rx Kanäle überbrückt werden (siehe Abb.9)

Transmission über eine Funkstrecke:

Beim Tauschen der Kabel an den Antennen um deren Phasengang zu separieren wird immer auch der Phasengang der Funkstrecke zwischen Tx und Rx enthalten sein.

Die oben beschriebene Theorie muss also um folgende Zusammenhänge erweitert werden:

Während der Transmissionsmessung über die Antennen ergeben sich die Phasenwerte entsprechend

$$(5.2.22) \quad \Phi_1 = \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(Luft1)} + \Phi_{(Antenne1)} + \Phi_{(Kabel1)} + \Phi_{(Kanal1)}$$

$$(5.2.23) \quad \Phi_2 = \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(Luft2)} + \Phi_{(Antenne2)} + \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal2)}$$

$$(5.2.24) \quad a_1 = \Phi_{(Luft1)} - \Phi_{(Luft2)} + \Phi_{(Antenne1)} - \Phi_{(Antenne2)} + \Phi_{(Kabel1)} - \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal1)} - \Phi_{(Kanal2)}$$

Und nach dem Tausch der Kabel an den Antennen

$$(5.2.25) \quad \Phi_{22} = \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(Luft1)} + \Phi_{(Antenne1)} + \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal2)}$$

$$(5.2.26) \quad \Phi_{12} = \Phi_{(Tx)} + \Phi_{(Luft2)} + \Phi_{(Antenne2)} + \Phi_{(Kabel1)} + \Phi_{(Kanal1)}$$

$$(5.2.27) \quad a_2 = \Phi_{(Luft2)} - \Phi_{(Luft1)} + \Phi_{(Antenne2)} - \Phi_{(Antenne1)} + \Phi_{(Kabel1)} - \Phi_{(Kabel2)} + \Phi_{(Kanal1)} - \Phi_{(Kanal2)}$$

Womit wieder gilt

$$(5.2.28) \quad a_1 - a_2 = 2(\Phi_{(Luft1)} - \Phi_{(Luft2)} + \Phi_{(Antenne1)} - \Phi_{(Antenne2)})$$

Bei allen weiteren Werten ergeben sich die selben Rechnungen wie bei der Transmissionsmessung über die Splitterbox.

5.2.2 Versuche

5.2.2.1 Experimenteller Ansatz

Zunächst wurden mit Hilfe von Transmissionsmessungen nach oben beschriebener Methode die Phasengänge der Kabel ermittelt. Anschließend wurden die selben Kabel mit Hilfe von Reflexionsmessungen noch einmal vermessen.

Stimmen die Werte überein so ist zum einen oben beschriebene Theorie richtig und zum anderen ließe sich die Transmissionsmessung über die Splitterbox durch eine Reflexionsmessung ersetzen.

5.2.2.2 Laborversuche

Die Kabel wurden beschriftet und jeweils zwei, nach beschriebener Methode abwechselnd an Kanal1 und Kanal2 angeschlossen. Dabei blieben sie weitestgehend auf den Kabeltrommeln aufgewickelt. Die verwendete Frequenz betrug 10,8 MHz.

Es wurden insgesamt drei verschiedene Kombinationen untersucht.

- 1.) 2 x 200m Kabel, Neu, auf Kunststoff
- 2.) 200m Kabel1, Neu, auf Kunststoff und 100m Kabel, gebraucht, auf Holz
- 3.) 200m Kabel1, Neu, auf Kunststoff und Kabel unbek. Länge, gebraucht, auf Kunststoff

Von jeder Kombination wurden dabei jeweils 10 Messungen mit einer Messdauer von 32 durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messdurchgänge wurden in ein LibreOffice Sheet importiert und jeweils der arithmetische Mittelwert gebildet. Die Mittelwerte dieser Messungen wurden anschließend entsprechend der genannten Rechenoperationen verarbeitet und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Es ergaben sich die folgenden Messwerte: (Abb.22 bis Abb.24)

(Die Erklärungen zu den Tabellen befinden sich im Anschluss der Darstellungen)

Kombination 1:

REF	Kombination 1			
Messung	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1-Ref2)/4 in °	
1	23,405	-28,714	13,02975	
2	23,409	-28,707	13,029	
3	23,403	-28,707	13,0275	
4	23,405	-28,713	13,0295	
5	23,403	-28,713	13,029	
6	23,403	-28,713	13,029	
7	23,406	-28,714	13,03	
8	23,402	-28,715	13,02925	
9	23,402	-28,714	13,029	
10	23,402	-28,715	13,02925	
Mittelwert	23,404	-28,7125	13,029125	
TRANS				
Messung	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1-Trans2)/2 in °	
1	13,447	-13,353	13,4	
2	13,448	-13,351	13,3995	
3	13,448	-13,353	13,4005	
4	13,447	-13,352	13,3995	
5	13,448	-13,353	13,4005	
6	13,448	-13,352	13,4	
7	13,448	-13,352	13,4	
8	13,447	-13,353	13,4	
9	13,447	-13,352	13,3995	
10	13,447	-13,352	13,3995	
Mittelwert	13,4475	-13,3523	13,3999	Übereinstimmung 0,972330017

Abb.22 - Messreihen Kombination 1

Kombination 2:

REF	Kombination 2			
Messungen	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1-Ref2)/4 in °	
1	-88,792	84,126	-43,2295	
2	-88,786	84,125	-43,22775	
3	-88,79	84,126	-43,229	
4	-88,794	84,129	-43,23075	
5	-88,79	84,127	-43,22925	
6	-88,791	84,128	-43,22975	
7	-88,792	84,127	-43,22975	
8	-88,791	84,128	-43,22975	
9	-88,792	84,127	-43,22975	
10	-88,792	84,128	-43,23	
Mittelwert	-88,791	84,1271	-43,229525	
TRANS				
Messungen	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1-Trans2)/2 in °	
1	-41,423	41,661	-41,542	
2	-41,423	41,662	-41,5425	
3	-41,421	41,66	-41,5405	
4	-41,424	41,661	-41,5425	
5	-41,422	41,661	-41,5415	
6	-41,422	41,661	-41,5415	
7	-41,421	41,662	-41,5415	
8	-41,42	41,663	-41,5415	
9	-41,42	41,663	-41,5415	
10	-41,423	41,662	-41,5425	
Mittelwert	-41,4219	41,6616	-41,54175	Übereinstimmung 0,960957818

Abb.23 - Messreihen Kombination 2

Kombination 3:

REF	Kombination 3			
Messungen	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °	
1	158,88	-163,756	80,659	
2	158,883	-163,756	80,65975	
3	158,884	-163,754	80,6595	
4	158,883	-163,757	80,66	
5	158,884	-163,757	80,66025	
6	158,882	-163,758	80,66	
7	158,883	-163,757	80,66	
8	158,885	-163,758	80,66075	
9	158,887	-163,759	80,6615	
10	158,886	-163,756	80,6605	
Mittelwert	158,8837	-163,7568	80,660125	
TRANS				
Messungen	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °	
1	83,671	-83,229	83,45	
2	83,672	-83,227	83,4495	
3	83,671	-83,228	83,4495	
4	83,671	-83,229	83,45	
5	83,671	-83,229	83,45	
6	83,673	-83,231	83,452	
7	83,672	-83,23	83,451	
8	83,672	-83,23	83,451	
9	83,672	-83,23	83,451	
10	83,672	-83,23	83,451	
Mittelwert	83,6717	-83,2293	83,4505	0,96656251

Abb.24 - Messreihen Kombination 3

Die Tabellen, die mit REF beschriftet sind, beziehen sich jeweils auf die Reflexionsmessungen, die mit TRANS beschrifteten auf die Transmissionsmessungen über die Splitterbox. Beide enthalten die gemessenen Phasenwerte in Grad. Die Spalten die mit Index 1 beschriftet wurden beziehen sich hierbei immer auf die Messungen, bei denen sich die Kabel- und Kanaladressen entsprachen. Die 3. Spalte beschreibt immer das Ergebnis der beschriebenen Rechenoperationen. Die mit „Übereinstimmung“ beschriftete Zelle zeigt das Verhältnis der resultierenden Mittelwerte von TRANS und REF.

Eine gesonderte Darstellung der Varianz schien unwichtig, da aus den Messwerten ersichtlich ist, dass diese wesentlich kleiner als die Messwerte ist.

5.2.2.3 Feldversuch

Für den Feldversuch wurden auf einer Wiese gegenüber des Firmengeländes vier Rx Antennen jeweils im Abstand von 4,5 Metern zueinander in einer Reihe aufgestellt (Abb.25). Im 90° Winkel dazu und genau gegenüberliegend der Rx₁ Antenne wurde in 50 Meter Entfernung die Tx Antenne platziert.



Abb.25 - Skizze des Messaufbaus

Bei diesen Messungen wurden Transmissionsmessungen über Antennen sowie über die Splitterbox und Reflexionsmessungen mit und ohne angeschlossene Antennen durchgeführt. Hierfür wurden sowohl die Kabel als auch die Antennen durchnummeriert und beschriftet.

Die Messungen wurden genauso durchgeführt wie im Labor-Versuch. Dabei wurden alle 4 Kanäle, die 4 Antennen, die vier verwendeten Kabel und die 4 benötigten Splitterbox-Kanäle entsprechend der entwickelten Theorie herausgerechnet.



Abb.26 - 4 Antennen Rx Array des Feldversuchs

Die verwendete Frequenz betrug 32,5 MHz.

Zur Auswertung sollte dann auch überprüft werden, ob die über die Reflexionsmessungen erhaltenen Phasengänge der Antennen benutzt werden können um eine glaubhafte Triangulation der Tx Position aus den Transmissionsmessungen zu berechnen.

Dies konnte jedoch ausbleiben, da bereits die erhaltenen Kabelphasenwerte der Reflexionsmessung mit angeschlossener Antenne nur unglaubliche Werte erzeugte.

Ergebnisse:

Phasenwerte	Kabel1-Kabel2 in °	Kabel1-Kabel3 in °	Kabel1-Kabel4 in °
TransAnt	41,04755	39,9185	34,91795
TransSplit	39,8243	38,83425	34,3131
RefAnt	-9,300475	-5,62525	-26,0059
RefOff	34,4727	33,5451	28,3211
Phasenwerte	Kanal1-Kanal2 in °	Kanal1-Kanal3 in °	Kanal1-Kanal4 in °
TransAnt	-1,87405	-2,3245	-0,51395
TransSplit	-1,9198	-2,17815	-0,5549
RefAnt	4,2401	-0,3383	22,30465
RefOff	-0,1468	-3,9303	7,0988
Phasenwerte	Antenne1-Antenne2 in °	Antenne1-Antenne4 in °	Antenne1-Antenne4 in °
TransAnt	-21,9844	-44,7086	-67,46345
TransSplit	x	x	x
RefAnt	-8,8575	-14,565	-3,38885
RefOff	x	x	x

Abb. 27 - Gegenüberstellung der Messwerte des Feldversuchs

*Legende: TransAnt: Transmissionsmessung über die Antennen
 TransSplit: Transmissionsmessung über die Splitterbox
 RefAnt: Reflexionsmessung mit Antenne
 RefOff: Reflexionsmessung mit offenem Ende*

Die genauen Messwerte befinden sich im Anhang (Kapitel 8.3). Hier zu sehen sind lediglich die Mittelwerte der Endauswertung

5.3 Antennenkalibrierung

5.3.1 Ansätze

Es wurden insgesamt drei weitere Möglichkeiten die Antennenphasen über eine Reflexionsmessung zu ermitteln untersucht.

1. Bestimmen der veränderten elektrischen Kabellänge
2. Bestimmen der Antenneneigenschaften
3. Erstellen einer Kalibrierfunktion

5.3.2 Experimentelle Randbedingungen

Eine Reflexionsmessung der Antennen auf der Resonanzfrequenz erzeugt keine glaubhaften Werte.

Diese Messungen müssen, bei angeschlossener Antenne, also oberhalb der Resonanzfrequenz durchgeführt werden.

Da alle Phasenwerte die das WERA System anzeigt relativ zu Kanal1 angegeben werden, sollte dieser einen möglichst konstanten Wert behalten. Das Tx Signal wurde also, mit Hilfe eines 1 zu 2 Splitters, einmal direkt auf Kanal1 gelegt und einmal zur Tx Antenne geführt. (Abb.X)



Abb.28 1 zu 2 Splitter

Um eventuelle Beeinflussungen der Antennen untereinander zu vermeiden wird nur eine Antenne vermessen.

Eine Reflexionsmessung mit angeschlossener Antenne lässt das Kabel bedingt durch den Phasensprung des Reflexionsfaktors länger oder kürzer erscheinen.

Durch die Differenzbildung zweier Messungen an einer zweimal unterschiedlich eingestellten Antenne kann die Änderung der Phase die sich an der Antenne ergeben hat heraus gerechnet werden.

Hierfür können die Zusammenhänge folgendermaßen beschrieben werden:

Transmission über eine Funkstrecke:

$$(5.3.2.1) \quad \Phi_1 = \Phi_{(Bezug)} \approx konst.$$

$$(5.3.2.2) \quad \Phi_2 = \Phi_{(Luft)} + \Phi_{(Antenne)} + \Phi_{(Kabel)} + \Phi_{(Kanal2)}$$

Womit gilt:

$$(5.3.2.3) \quad a_1 = \Phi_{(Bezug)} - (\Phi_{(Luft)} + \Phi_{(Antenne)} + \Phi_{(Kabel)} + \Phi_{(Kanal2)})$$

Nach dem Manipulieren der Antenne ergibt sich durch die gleiche Messung:

$$(5.3.2.4) \quad a_2 = \Phi_{(Bezug)} - (\Phi_{(Luft)} + \Phi_{(AntenneNeu)} + \Phi_{(Kabel)} + \Phi_{(Kanal2)})$$

Bildet man die Differenz dieser beiden Messungen ergibt sich dann

$$(5.3.2.5) \quad a_2 - a_1 = \Phi_{(Antenne)} - \Phi_{(AntenneNeu)}$$

Reflexionsmessung:

Hier ergeben sich die Zusammenhänge entsprechend:

(Φ_1 entspricht hier dem doppelten Phasengang des Verbindungskabels zwischen Kanal1 und Splitter, kann jedoch weiter als Konstante gesehen werden)

$$(5.3.2.6) \quad \Phi_2 = 2 \cdot \Phi_{(Kabel)} + \Phi_{(Ref.FaktorAntenne)} + \Phi_{(Kanal2)}$$

Was für den Messwert bedeutet:

$$(5.3.2.7) \quad a_1 = \Phi_{(Bezug)} - (2 \cdot \Phi_{(Kabel)} + \Phi_{(Ref.FaktorAntenne)} + \Phi_{(Kanal2)})$$

Und nach der Manipulation:

$$(5.3.2.8) \quad a_2 = \Phi_{(Bezug)} - (2 \cdot \Phi_{(Kabel)} + \Phi_{(Ref.FaktorAntenneNeu)} + \Phi_{(Kanal2)})$$

Was nach Differenzbildung zu folgendem Ergebnis führt:

$$(5.3.2.9) \quad a_2 - a_1 = \Phi_{(\text{Ref.FaktorAntenne})} - \Phi_{(\text{Ref.FaktorAntenneNeu})}$$

Des Weiteren lässt sich durch Differenzbildung einer Reflexionsmessung mit angeschlossener Antenne und einer mit offener Leitung der Phasensprung des Reflexionsfaktors bestimmen.

Die Reflexionsmessung am offenen Kabel ergibt dabei:

$$(5.3.2.10) \quad a_1 = \Phi_{(\text{Bezug})} - (2 \cdot \Phi_{(\text{Kabel})} + \Phi_{(\text{Kanal2})})$$

Und mit angeschlossener Antenne:

$$(5.3.2.11) \quad a_2 = \Phi_{(\text{Bezug})} - (\Phi_{(\text{Kabel})} + \Phi_{(\text{RefFaktor})} + \Phi_{(\text{Kabel})} + \Phi_{(\text{Kanal2})})$$

Womit sich nach der Differenzbildung folgender Zusammenhang ergibt:

$$(5.3.2.12) \quad a_1 - a_2 = \Phi_{(\text{RefFaktor})}$$

5.3.3 Messaufbau

Die Messungen wurden auf dem Parkplatz der Firma Helzel durchgeführt. Dabei wurden Tx Antenne(Abb.29) und Rx Antenne(Abb.28) mit 30 Meter Abstand aufgestellt.

Da es am Standort der Rx Antenne nicht möglich war die Radials Richtung Boden abzuspannen wurden diese einfach im 90° Winkel zueinander auf das unterhalb der Rx Antenne befindliche Gebüsch gelegt.

Die Radials der Tx Antenne wurden, so gut es am Standort ging, Richtung Boden abgespannt. Eine Kontrolle der resultierenden Charakteristiken mit dem FSH3 ergab dabei absolut akzeptable Verläufe des SWR im gewünschten Frequenzbereich zwischen 30 und 35 MHz.

Im Verlauf der Messungen wurde immer wieder darauf geachtet, dass keine Autos innerhalb der Funkstrecke oder zu nahe bei den Antennen parken, um Störungen ausschließen zu können.



Abb.29 - Tx Antenne



Abb.30 - Rx Antenne

5.3.4 Bestimmen der veränderten elektrischen Kabellänge

Hierbei sollte der RMS Wert des reflektierten Signals einer Antenne über einen relativ weiten Bereich weit oberhalb der Resonanzfrequenz gemessen werden. Aus den Abständen der Maxima dieser Werte im Frequenzbereich sollte dann die neue Kabellänge ermittelt und aus diesem Ergebnis Rückschlüsse auf den Imaginärteil der Antenne gezogen werden.

Die Idee wurde durch weitere Überlegungen wieder verworfen, da sie zwei große Schwachpunkte aufweist.

Zum einen benötigt man zu ihrer Durchführung den Verkürzungsfaktor des Kabels, welcher nur als Richtwert gesehen aber nicht für Berechnungen heran gezogen werden sollte. Zum anderen wäre es nötig in sehr kleinen Frequenzschritten zu messen um die Maxima der Überlagerungen und deren mittleren Abstand im Frequenzbereich so genau wie möglich bestimmen zu können. Dies würde, mit gegebener Hardware, viel zu viel Zeit in Anspruch nehmen um als Methode der regelmässigen Kalibrierung praktikabel zu sein.

Wenn man zum Beispiel einen Bereich von 10 MHz bei der kleinsten wählbaren Sample Rate mit einer Schrittweite von 10 kHz untersuchen wollte, dann würde dieser Messvorgang mindestens 2,2 Stunden dauern. Selbst dann wäre der resultierende Wert nicht genau genug.

Geht man nun davon aus, dass der Verkürzungsfaktor als genau angenommen werden kann, könnte ja die ermittelte Differenz der Maxima höchstens auf 0,01 MHz genau sein. Mit der bereits erwähnten Formel zur Kabellänge ergäbe sich dann nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz folgende Unsicherheit für die Kabellänge:

$$(5.3.4.1) \quad \frac{\partial l_{Kabel}}{\partial \Delta f} = \left| - \frac{VKF \cdot c}{2 \cdot (\Delta f)^2} \cdot u(\Delta f) \right|$$

Was bei Beispielhaften Werten von $\Delta f = 0,6$ MHz und einem VKZ von 0,83 bei genannten $u(\Delta f)$ dem Wert $\pm 3,46$ Metern entspräche. Die entspräche bei einer Wellenlänge von ca. 9,2 Metern bereits Phasenunsicherheiten von ca. $\pm 120^\circ$.

5.3.5 Bestimmung der Bandpass Eigenschaften

Es wurde versucht, die Induktivität und die Kapazität der Antenne zu bestimmen und aus dieser Information und der Annahme eines Bandpass Verhaltens den Phasengang der Antenne abzuleiten. Dieser Ansatz sollte über den Reflexionsfaktor realisiert werden.

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt wird der Reflexionsfaktor beschrieben durch:

$$(5.3.5.1) \quad r = \frac{Z_a - Z_l}{Z_a + Z_l}$$

Wenn man also nun davon ausgeht, dass die Antennenimpedanz im Fall von relativ hohen oder relativ niedrigen Frequenzen fast nur noch aus dem Imaginärteil besteht, würde dies für den Reflexionsfaktor bedeuten er könnte ungefähr beschrieben werden als:

$$(5.3.5.2) \quad r = \frac{j \cdot A - Z_l}{j \cdot A + Z_l}$$

wobei A eben den Imaginärteil der Antenne zusammenfasst.

Nach komplex konjugierter Erweiterung könnte man diesen Zusammenhang auch in folgender Form ausdrücken:

$$(5.3.5.3) \quad r = - \frac{(Z_l - j \cdot A)^2}{Z_l^2 + A^2}$$

Und nach Auflösen der binomischen Formel und der Klammer im Zähler:

$$(5.3.5.4) \quad r = \frac{A^2 - Z_l^2 + 2jZ_lA}{Z_l^2 + A^2}$$

Womit gelten muss:

$$(5.3.5.5) \quad \tan(\phi_{\text{ref}}) = -\frac{2Z_lA}{Z_l^2 - A^2}$$

Hierbei ist mit $\tan(\phi_{\text{ref}})$ der Tangens des Phasensprungs des Reflexionsfaktors gemeint. Dieser Wert lässt sich also messtechnisch ermitteln.

Löst man obige Formel nun durch Anwendung der „Mitternachtsformel“ nach A auf so erhält man zwei mögliche Lösungen für A, beschrieben durch:

$$(5.3.5.6) \quad A_{1;2} = -\frac{Z_l}{\tan(\phi_{\text{ref}})} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 + \tan(\phi_{\text{ref}})^2}\right)$$

Da wir jedoch im hohen Frequenzbereich messen dürfte für diesen Fall nur die positive Lösung von A Gültigkeit besitzen.

Dies begründet sich aus der Überlegung, dass, bedingt durch die Gesetzmässigkeit nach der $1/j = -j$ ist, die kapazitiven Anteile des Imaginärteils immer mit negativem Vorzeichen behaftet sein müssen. Diese sind jedoch oberhalb der Resonanzfrequenz kleiner als die induktiven Anteile. Die positiven Ergebnisse für A sind in unserem Fall also die Richtigen.

Um A näher zu beschreiben und aus diesem Zusammenhang wiederum die Induktivität und die Kapazität der Antenne zu bestimmen wurde nun der komplexe Widerstand der Antenne inklusive der Anpassungsschaltung bestimmt. Es ergab sich folgende Formel:

(Im Ersatzschaltbild wurde R_a aus den genannten Vereinfachungsgründen ignoriert. L_a und die einstellbare Induktivität wurden zusammen gefasst)

$$(5.3.5.7) \quad Z_{\text{gesamt}} = j \cdot \left(\frac{\omega L_1 \cdot \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a} \right)}{\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a} + \omega L_1} - \frac{1}{\omega C_1} \right)$$

Die Variable A aus zuerst genannter Herleitung entspricht also Z_{gesamt} ohne j.

Aufgelöst nach L_a ergibt dies

$$(5.3.5.8) \quad L_a = \frac{L_1 \cdot \left(A + \frac{1}{\omega C_1} \right)}{\omega L_1 - A - \frac{1}{\omega C_1}} + \frac{1}{\omega^2 C_a}$$

und nach C_a

$$(5.3.5.9) \quad C_a = \frac{1}{\omega^2 \cdot \left(L_a - \frac{L_1 \cdot \left(A + \frac{1}{\omega C_1} \right)}{L_1 \omega - A - \frac{1}{\omega C_1}} \right)}$$

Wenn man davon ausgeht, dass L_a und C_a zumindest für einen kleinen Frequenzbereich als konstante Werte angenommen werden können, so könnte man zunächst einen Wert A_1 bei einer definierten Kreisfrequenz ω_1 bestimmen und anschließend einen Wert A_2 bei der Kreisfrequenz ω_2 . Setzt man nun die Werte A_2 und ω_2 in die Gleichung für C_a und die Gleichung für $C_{a(\omega_2; A_2)}$ in die Gleichung $L_{a(\omega_1; A_1)}$ so erhält man nach Umformung nach L_a den Zusammenhang:

$$(5.3.5.10) \quad L_a = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2} \cdot \left(\frac{L_1 \cdot \left(A_1 + \frac{1}{\omega_1 C_1} \right)}{\omega_1 L_1 - A_1 - \frac{1}{\omega_1 C_1}} - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \cdot \frac{L_1 \cdot \left(A_2 + \frac{1}{\omega_2 C_1} \right)}{\omega_2 L_1 - A_2 - \frac{1}{\omega_2 C_1}} \right)$$

Womit man einen Wert für L_a bestimmt hat der anschliessend in die Gleichung für $C_{a(\omega_2; A_2)}$ eingesetzt werden kann. (Statt ω könnte hier auch mit den Verhältnissen der Frequenzen gerechnet werden, da sich 2π kürzen lässt)

Auch dieser Ansatz wurde nach Überlegungen zur Messunsicherheit wieder verworfen. Geht man nämlich von einer Unsicherheit von mindestens $\pm 2^\circ$ aus so erhöht sich dieser Wert durch die Differenzbildung von zwei dieser Messwerte auf $\pm 4^\circ$. Die Unsicherheit die sich aus diesem Grund auf die Rechnungen zur Ermittlung von L_a niederschlägt ist so groß, dass unmöglich genaue Werte dabei heraus kommen können.

Dies gilt vor allem wenn man bedenkt, dass es sich bei den Werten der Induktivität und der Kapazität um Werte im Bereich 10^{-6} bis 10^{-12} handelt.

Auch zur Bestimmung des zusammengefassten Blindanteils der Antenne sind die so erhaltenen Werte zu ungenau.

5.3.6 Erstellen einer Kalibrierfunktion

Es gibt eine, wie auch immer geartete, Korrelation zwischen dem Phasensprung des Reflektionsfaktors gemessen bei einer Frequenz oberhalb der Arbeitsfrequenz und dem Phasengang bei einer Transmissionsmessung auf der Arbeitsfrequenz.

Diesen Zusammenhang kann man in eine Regressionsfunktion speichern, welche die Abhängigkeit der Höhe der Änderung des Phasengangs bei der Transmissionsmessung von der Höhe der Änderung des Phasensprungs bei der Reflexionsmessung beschreibt.

So kann dann über eine Reflexionsmessung die Änderung bestimmt werden, die der Phasensprung des Reflexionsfaktors im Vergleich zum Phasensprung des Reflexionsfaktors bei optimal eingestellter Antenne erfahren hat und mit Hilfe der Regressionsfunktion die resultierende Veränderung der Phase bei der Transmissionsmessung berechnet werden.

Die Untersuchungen zu diesem Ansatz zielten dabei darauf ab, heraus zu finden, ob die resultierende Kalibrierfunktion unabhängig vom Standort erstellt werden könnte. Wäre dies der Fall so könnte die Funktion vor der Installation in der Firma aufgenommen werden, und wäre dann weiterhin gültig nachdem die Antenne an ihrem Bestimmungsort aufgestellt wurde.

Auch hier muss man sich jedoch darüber im Klaren sein, dass durch Differenzbildung zweier Messwerte die Unsicherheit mindestens $\pm 4^\circ$ beträgt.

5.3.6.1 Versuch

Um die Messungen durchzuführen wurde eine Antenne an Kanal2 angeschlossen und Kanal1 direkt mit dem Tx Signal versorgt.(Abb.31)

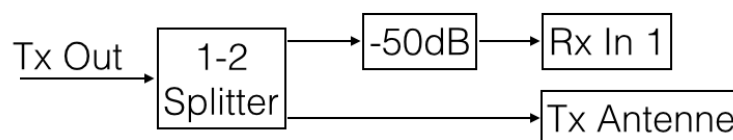


Abb.31 Skizze Signalwege 1 zu 2 Splitter

Dann wurde die Rx Antenne zunächst so optimal wie möglich auf die Arbeitsfrequenz von 32,5 MHz eingestellt und jeweils 10 Transmissionsmessungen auf der Arbeitsfrequenz und 10 Reflexionsmessungen oberhalb der Resonanzfrequenz, bei 40 MHz, durchgeführt.

Nach der Messung bei optimal eingestellter Antenne wurde die Antenne nun mit Hilfe der einstellbaren Induktivität der Anpassungsschaltung langsam verstimmt. Dabei wurde versucht, die Resonanzfrequenz so genau wie möglich um jeweils 0,5 MHz zu verstellen.

Nach verstimmen der Antenne folgte dann eine weitere Serie von Transmissionsmessungen und Reflexionsmessungen nach dem oben beschriebenen Schema.

So konnte nun im Verlauf von mehreren Messungen der Phasengang bei der Transmission und bei der Reflexion festgehalten werden. Wobei jede Messung eben einer mehr oder weniger stark verstimmtten Antenne entspricht.

Es wurden drei Messungen unterhalb der Arbeitsfrequenz, und drei oberhalb der Arbeitsfrequenz durchgeführt.

Bei der anschließenden Auswertung wurden dann jeweils die Differenzen des Phasengangs jeder Messung zur ersten Messung gebildet.

Nun konnten die Reflexionsdifferenzen als X-Werte und die Transmissionsdifferenzen als Y Werte definiert und daraus einer Regressionsfunktion gebildet werden.

Dies wurde zunächst an einem Standort, bei 3 unterschiedlichen Fußpunkthöhen und dann an einem anderen Standort, mit den gleichen Fußpunkthöhen untersucht.

Die Standorte lagen circa 6 Meter voneinander entfernt.

Bei beiden Standorten entsprach sich der Untergrund unterhalb der Antennen.

Im Anschluss wurden die resultierenden Regressionsfunktionen mit Hilfe von Blindtests überprüft.

Ergebnisse:

Regressionsfunktionen:

(hier abgebildet sind nur die sich ergebenden Regressionsgeraden und die Mittelwerte der Messungen, die Messwerte befinden sich im Anhang Kapitel 8.4)

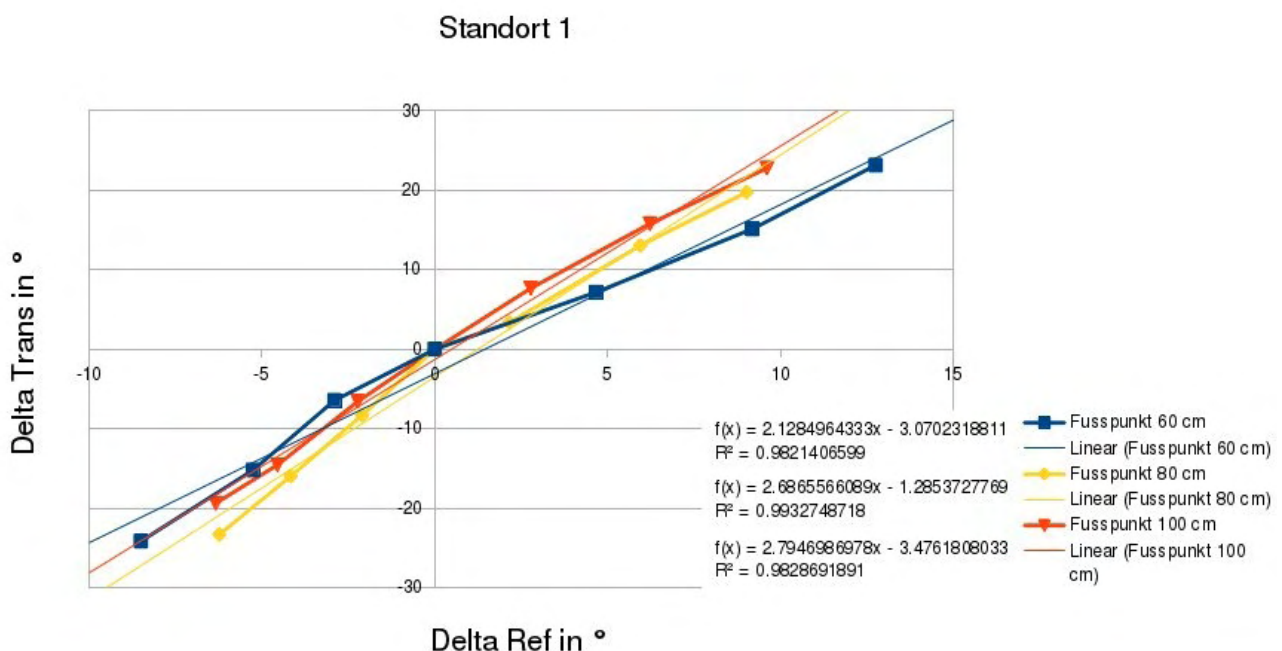


Abb.32 Regressionen Standort 1

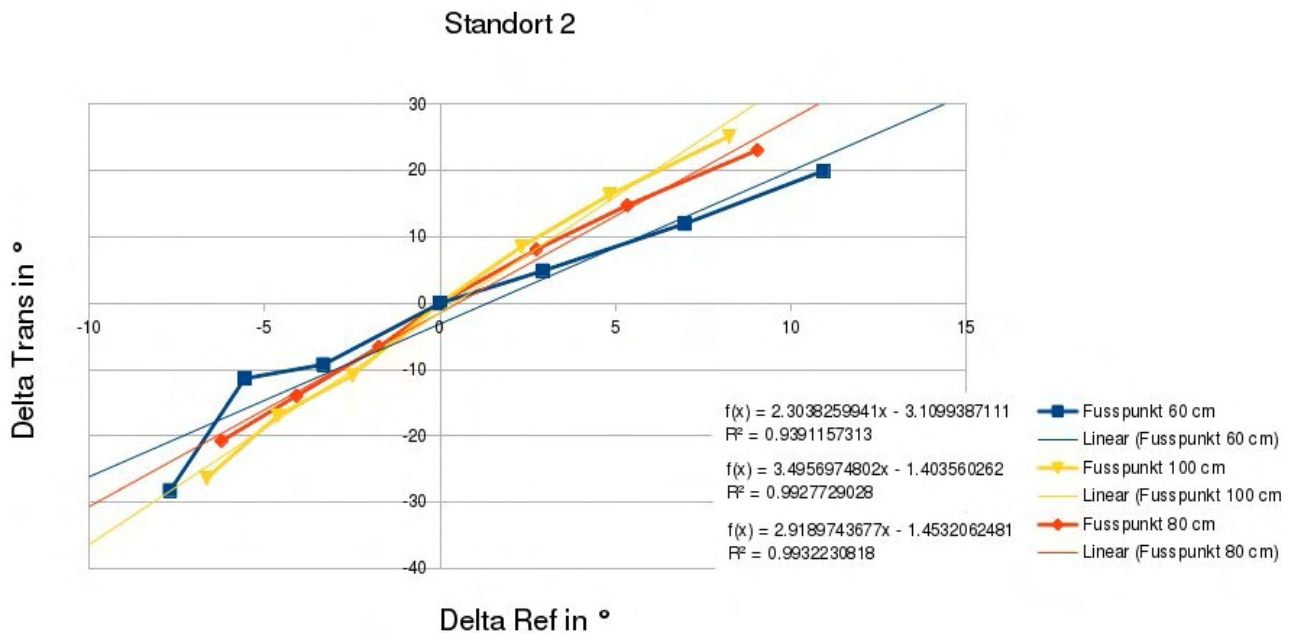


Abb.33 Regressionen Standort 2

Blindtests:

Jeder Blindtest wurde an einem unabhängigen Tag, jedoch immer mit der selben Antenne durchgeführt.

Dafür wurde die Antenne zunächst neu aufgestellt und dann, sowohl von der Transmission als auch von der Reflexion, ein „Standard“ Wert eingemessen, auf den die Änderungen bezogen werden konnte. Dieser „Standard“ kann beliebig gesetzt werden. Ist aber nötig, da die Regressionsfunktion nur die Abhängigkeit der Änderungen bei der Transmission von den Änderungen bei der Reflexion beschreibt.

Es wurden drei verschiedene Probleme untersucht.

- lineare Änderungen der einstellbaren Induktivität
- extreme Änderungen der Antenneneigenschaften
- geänderter Untergrund

Die ersten Tests bezogen sich auf die Reproduzierbarkeit der aufgestellten Regressionsgeraden.

Die Antenne wurde also auf beliebige Art und Weise über die einstellbare Induktivität verstimmt, ohne die neue Resonanzfrequenz zu überprüfen.

Dann wurde erneut eine Reflexionsmessung durchgeführt.

Die hierdurch gewonnenen Werte der Änderung während der Reflexionsmessung wurden dann entsprechend der gewonnenen Regressionsgeraden verrechnet und die sich theoretisch ergebenden Phasenwerte der Transmission festgehalten.

Hierzu wurde einfach die berechnete Änderung der Transmission zum eingemessenen Standard addiert.

Danach wurde eine Transmissionsmessung durchgeführt und so überprüft, ob sich die absoluten Werte aus Theorie und Praxis entsprechen.

Bei den zweiten Tests sollte dann untersucht werden, ob sich extreme Änderungen an den Antennen, wie das Loslösen von Radials, auch durch die Regressionsfunktionen kompensieren lassen könnten.

Die dritten Test zielten darauf ab heraus zu finden, inwiefern die Änderung des Untergrunds unterhalb der Antenne einen Einfluss auf die Regressionsfunktionen haben könnte.

Während dieser Tests wurden jeweils nur zwei Messungen je Konfiguration durchgeführt, es handelt sich bei den gezeigten Werten also nicht um Mittelwerte aus 10, sondern um eine von 2 Messungen die direkt hintereinander durchgeführt wurden. Die Messwerte entsprachen sich hierbei immer genug um aus den bisherigen Erfahrungen sagen zu können, dass die Messung erfolgreich war und eine Mittelwertbildung nicht nötig ist.

Lineare Änderungen der Induktivität

Es wurden folgende Messdurchgänge durchgeführt:

- 1.) Definierte Fußpunkthöhe 60 cm; Standard bei optimal eingestellter Antenne
- 2.) Unbekannte Fußpunkthöhe, alter Standard weiter benutzt
- 3.) Unbekannte Fußpunkthöhe, neuer Standort, Standard beliebig nach Standortänderung

Diese wurden anschließend entsprechend der Regressionsfunktionen beider Standorte verrechnet.

Es ergaben sich die Messwerte auf Seite 50.

Extreme Änderungen der Antenneneigenschaften

Um zu überprüfen ob sich die Regressionsfunktionen auch auf nicht lineare Änderungen der Antenneneigenschaften durch externe Fehler anwenden lassen wurden noch weitere Blindtest durchgeführt.

Dabei ging es vor allem darum, extreme Änderungen an der Antenne nachzustellen indem die Lage der Radials willkürlich geändert oder der Fusspunkt extrem verstellt wurde.

Ausserdem wurde hierbei überprüft wie sich eine veränderte Bodenfeuchtigkeit auf die Korrelation zwischen Regressionsgerade und Messwert auswirkt, da es kurz vor den Messungen noch geregnet hatte.

Geänderter Untergrund:

Um schließlich zu prüfen, inwiefern die Kalibrierfunktion von der Bodenbeschaffenheit abhängt, wurde noch ein letzter Blindtest mit der selben Antenne durchgeführt. Diesmal wurde sie jedoch mit Hilfe eines Schirmständers direkt auf den gepflasterten Parkplatz gestellt und wieder die Methode zur Überprüfung linearerer Änderungen der Induktivität durchgeführt.

Es ergaben sich die Messwerte auf Seite 52.

extreme Änderungen:

Regressionen aus Standort 2											
StartRefNeu	100.35										
StartTransNeu	-179.5										
Blindtest(FP?)	Delta Ref	Delta Trans berechnet(60)	Trans berechnet(60)	Delta Trans berechnet(80)	Trans berechnet(80)	Delta Trans berechnet(100)	Trans berechnet(100)	Trans gemessen	Mittel Trans berechnet	Mittel Trans gemessen	
1	-3.85	-11.9796687864	168.5203312116	-12.6912575637	167.808724369	-14.8619955608	165.6390044392	167.182	167.322593624	167.182	167.322593624
2	-8.785	-23.3490500693	157.1509499307	-27.0963950683	153.4056039317	-32.113265256	148.3867373744	159.919	152.9804304123	159.919	152.9804304123
	ein Radial stark verändert										
3	-3.115	-33.4052505335	147.0947494655	-39.8377191834	140.6622808166	-47.3719821266	133.1280178734	137.853	140.2850160522	137.853	140.2850160522
	noch ein Radial stark verändert										
4	-25.402	-61.6317266132	118.8682733868	-75.6009931364	104.8990068636	-90.201267654	90.298732346	137.518	104.6886708654	137.518	104.6886708654
5	-24.995	-60.6940594336	119.8059305664	-74.4129705688	106.0870294312	-88.7785187796	91.7214812204	143.386	105.871480406	143.386	105.871480406
	ein Radial "zurück"										
6	-12.99	-33.036988745	147.4639616255	-39.3706832845	141.1293167155	-46.8126705298	133.6873294702	149.13	140.7600028037	149.13	140.7600028037
	zweites Radial "zurück"										
7	-5.037	-14.7143102434	165.7856887566	-16.1560801382	164.3439198618	-19.0113884698	161.4886115302	162.343	163.8727403829	162.343	163.8727403829
	FP verstell										
8	-10.25	-26.7241551506	153.7758448494	-31.372693517	149.127306483	-37.2344594341	143.265540566	164.918	148.7228972994	164.918	148.7228972994
	FP verstell										
9	-14.208	-36.6426984353	144.6573015647	-42.9259940694	137.6740059356	-51.0704300607	129.4295699393	142.599	137.2202824799	142.599	137.2202824799

Abb.37 Extrem-Test

Die ersten beiden Messungen des extrem Tests dienten nur dazu, zu überprüfen, ob die Formeln, bei veränderter Bodenfeuchtigkeit, überhaupt angewendet werden können und wurden genau wie bei den Untersuchungen zur linearen Änderung der Induktivität durchgeführt.

Bei den weiteren Messungen steht oberhalb der Ergebnisse welche Änderung vor der Messung durchgeführt wurde.

geänderter Untergrund:

Regressionen aus Standort 1											
StartTrans	17.928										
StartRef	81.881										
Blindtest(FP100)	Delta Ref	Delta Trans berechnet(60)	Trans berechnet(60)	Delta Trans berechnet(80)	Trans berechnet(80)	Delta Trans berechnet(100)	Trans berechnet(100)	Trans gemessen	Mittel Trans berechnet	Mittel Trans gemessen	
1	1.629	0.39708888087	18.32508888087	3.091027939	21.019027939	1.0763833627	19.0043833627	26.93	19.4495000368	26.93	19.4495000368
2	2.276	1.7742260011	19.7022260011	4.829230065	22.7572260065	2.8845534151	20.8125534151	30.156	21.090698271	30.156	21.090698271
3	2.832	2.957670018	20.885670018	6.3229555395	24.2505555395	4.4384058868	22.3664058868	31.686	22.5010104814	31.686	22.5010104814
4	-0.544	-4.2281339408	13.6998660592	-2.746895721	15.1811404279	-4.9964968807	12.9315031093	16.89	13.9375031988	16.89	13.9375031988
5	-3.544	-10.6136232407	7.3143476793	-10.8065293988	7.1214708012	-13.3805929807	4.5474070393	2.862	6.3277514566	2.862	6.3277514566
Regressionen aus Standort 2											
Blindtest(FP100)	Delta Ref	Delta Trans berechnet(60)	Trans berechnet(60)	Delta Trans berechnet(80)	Trans berechnet(80)	Delta Trans berechnet(100)	Trans berechnet(100)	Trans gemessen	Mittel Trans berechnet	Mittel Trans gemessen	
1	1.629	0.6429938333	18.5709938333	3.3018029669	21.2298029669	4.280309332	22.2189309332	26.93	20.6732426878	26.93	20.6732426878
2	2.276	2.1335692515	20.0615692515	5.1903794128	23.1183794128	6.5526472029	24.4806472029	30.156	22.5535319557	30.156	22.5535319557
3	2.832	3.4144965042	21.3424965042	6.8133291612	24.7413291612	8.4962550019	26.4242550019	31.686	24.1693602224	31.686	24.1693602224
4	-0.544	-4.3632200519	13.5647799481	-3.0411283041	14.8868716959	-3.3052196912	14.6227803088	16.89	14.3581439843	16.89	14.3581439843
5	-3.544	-11.2746980342	6.6533019658	-11.78980514072	6.1299465928	-13.7923121318	4.1356878682	2.862	5.6396461423	2.862	5.6396461423

Abb.38 geänderter Untergrund

6 Auswertung und Ausblick

6.1 Auswertung Kabelkalibrierung

6.1.1 Laborversuch

Die Ergebnisse des Laborversuchs zur Kabelkalibrierung waren sehr vielversprechend. Wie man an der Zelle „Übereinstimmung“ erkennen kann entsprechen sich die hierbei resultierenden Ergebnisse zu mindestens 96%.

Dies wurde zum einen als Beweis gedeutet, dass die entwickelte Theorie zur Bestimmung der Phasengänge der Einzel-Komponenten richtig ist. Zum anderen wurde es als Indiz dafür gesehen, dass es möglich wäre die Kalibriermessungen über die Splitterbox durch Reflexionsmessungen zu ersetzen.

Die Durchführung des Feldversuchs sollte diese Ergebnisse anschliessend auch im Feld bestätigen.

6.1.2 Feldversuch

Aus dem Feldversuch konnte man mehrere Schlüsse ziehen. Zum einen wurde erneut bestätigt, dass die Methode, die zur Bestimmung der Phasendifferenzen der einzelnen Komponenten entwickelt wurde, richtig ist. Dies lässt sich leicht erkennen wenn man die Werte, die sich bei der Transmissionsmessung über die Antennen und über die Splitterbox ergeben haben, vergleicht. Diese entsprechen sich auf jeden Fall ausreichend genug um sagen zu können, dass in beiden Fällen sehr ähnliche Ergebnisse herausgekommen sind.

Vergleicht man die Kabelphasen-Werte der Reflexionsmessung mit denen der Transmissionsmessungen sind die Ergebnisse wiederum nicht ganz so eindeutig.

Hierbei resultierten Übereinstimmungen von ca. 83%.

Betrachtet man jedoch die absoluten Werte so fällt auf, dass die Differenz der Werte die sich bei den Transmissionsmessungen ergeben haben zu denen der Reflexionsmessungen fast konstant 6° ergeben. Es scheint sich also um einen systematischen Fehler zu handeln.

Die Erklärung hierfür könnte der große zeitliche Abstand zwischen den Transmissionsmessungen und den Reflexionsmessungen sein.

Die Messkampagne des Feldversuchs hat den ganzen Tag in Anspruch genommen. Dabei wurde morgens mit den Transmissionsmessungen begonnen. Die Reflexionsmessungen wurden erst Nachmittags zwischen 16:00 und 19:00 durchgeführt. Es besteht also durchaus die Möglichkeit, dass zufällig genau das Kabel im Laufe des Tages durch eine mechanische Beanspruchung seinen Phasengang verändert hat. Das würde zu einer systematischen Abweichung führen, die sich auf alle Kabel gleich auswirkt.



Abb.39 - provisorischer Kabelkanal

Dies liegt vor allem deswegen im Bereich des möglichen, weil die Kabel von der Messstation bis zum Feld über die Hofeinfahrt der benachbarten Firma gelegt werden mussten. Zwar hat man hier einen provisorischen Kabelkanal aus Holzlatten aufgebaut (Abb.29). Dennoch könnte ein über die Kabel hinweg fahrendes Auto einen solchen Effekt verursachen.

Weitere Versuche mit älteren, gebrauchten Kabeln und neuen, unbenutzten Kabeln zeigten später, dass die Transmissionsmessungen zur Kabelkalibrierung vermutlich nur dann durch Reflexionsmessungen ersetzt werden können, wenn die Kabel vollkommen intakt sind und sich an keiner Stelle entlang des Kabels der Wellenwiderstand sprunghaft ändert, sie also keine zu starke mechanische Beanspruchung erfahren haben.

Eine weitere Schlussfolgerung die sich aus dem Feldversuch ergeben hat war, dass eine Reflexionsmessung mit angeschlossenen Antennen auf der Resonanzfrequenz der Antenne keine Möglichkeit darstellt um Rückschlüsse auf den Phasengang der Antennen während der Transmission zu ziehen.

Dies erkennt man, wenn man die Phasenwerte der Kabel aller Messungen miteinander vergleicht. Korrekte Messwerte dürften hier keine starken Abweichungen von den restlichen Messungen aufweisen.

Ein Vergleich der RMS Werte die Reflexionsmessungen über einen Frequenzbereich in der Nähe der Resonanzfrequenz an einem Kabel mit einem 50 Ohm Abschluss, einem offenen Kabel, einem kurzgeschlossenen Kabel und dem selben Kabel mit einer angeschlossener Antenne ergab, machte dann auch deutlich was der Grund hierfür war.

Die folgende Darstellung zeigt die grafische Auswertung dieser Daten: (die Resonanzfrequenz der Antenne betrug 32,5 MHz, die Schrittweite 0,01 MHz)

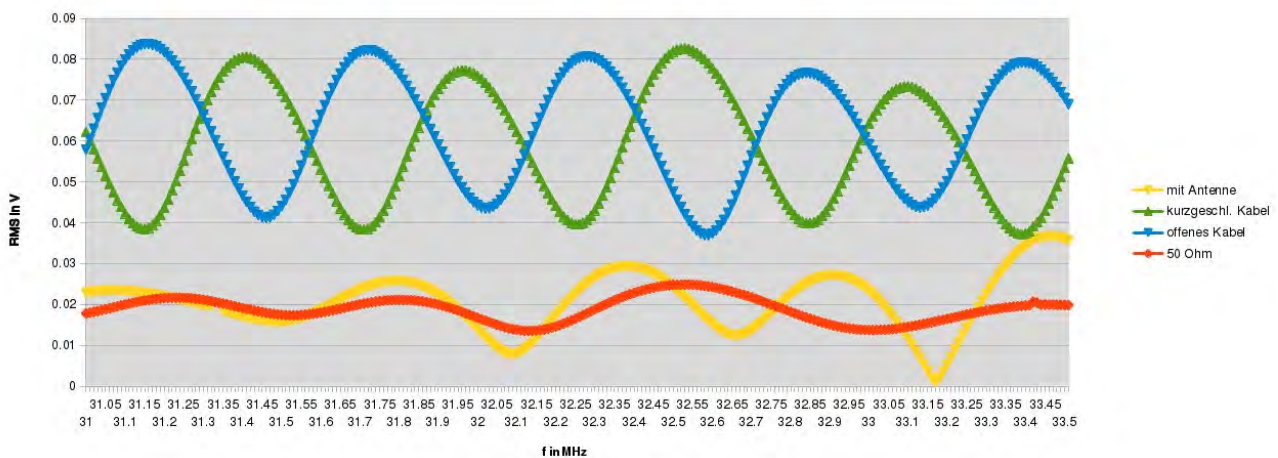


Abb.40 Verlauf RMS

Der gegebene Verlauf der Messwerte deutet darauf hin, dass, selbst wenn der ohmsche Anteil der Antenne leicht von der Impedanz des Kabels abweichen sollte, die Reflexionen in der Nähe der Resonanzfrequenz an der Verbindungsstelle nicht deutlich genug sind um Aussagen über Antenneneigenschaften daraus ableiten zu können.

Wie man sieht, sind die RMS Werte des reflektierten Signals bei Abschluss mit einem 50 Ohm Widerstand ähnlich niedrig wie diejenigen, die sich bei der Messung mit angeschlossener Antenne ergeben.

Die Werte die sich bei der Messung mit einem 50 Ohm Widerstand ergeben bestehen jedoch nur aus dem Rauschen, welches sich durch Mehrfachreflexionen auf der Leitung und leichte Abweichung des Kabels von der gewünschten 50 Ohm Impedanz ergibt.

Der ADC wird in beiden Fällen also hinter dem Quadraturmischer viele Messpunkte erhalten, die lediglich dem Rauschen auf der Leitung entnommen wurden. Dennoch wird an dieser Stelle vom System natürlich eine Fitkurve durch die erhaltenen Messpunkte gelegt und aus diesen Werten der Phasenversatz der Kanäle zu Kanal1 ermittelt.

Dies führt, vermutlich, zu fehlerhaften Phasenwerten, aus denen sich keine Rückschlüsse auf den Phasengang der Antenne bei der Transmission ziehen lassen.

Dies wird deutlich wenn man für die oben gezeigten Messungen die Phasenwerte miteinander vergleicht:

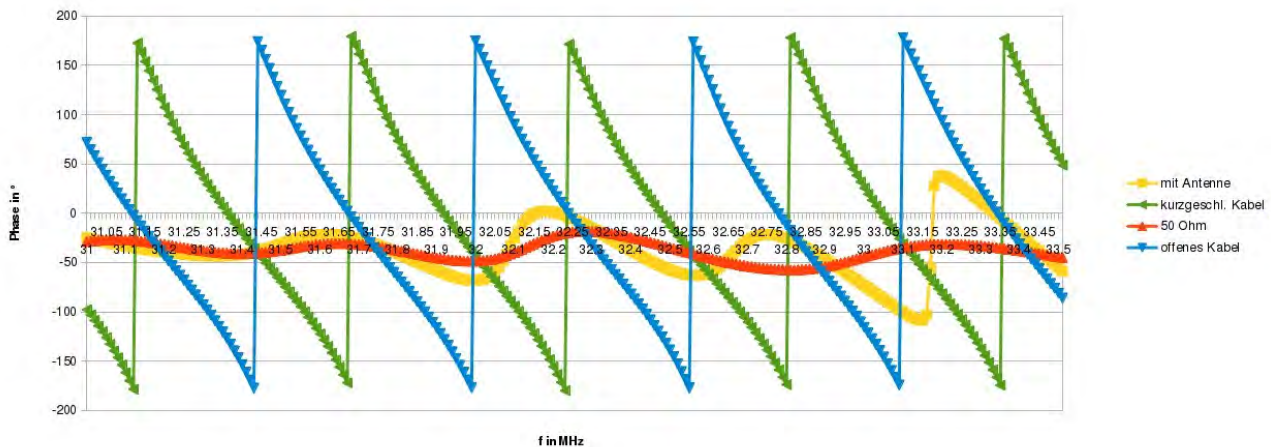


Abb.41 Verlauf Phasenwerte

An dieser Stelle würde man von einer glaubwürdigen Messung an der Antenne einen Verlauf erwarten, der dem einer Tangens-Funktion entspricht. (Also ähnlich wie bei den Messungen an einem offenen, oder einem kurzgeschlossenen Kabel). Dieser aber im Frequenzbereich zwischen der Messung am offenen Kabel und der am kurzgeschlossenen Kabel liegt. Also sozusagen „zur Seite“ verschoben ist.

Betrachtet man die Grafik jedoch etwas genauer, so kann man erkennen, dass ab einer bestimmten Frequenz oberhalb der Resonanzfrequenz scheinbar wieder eine schlüssiger Verlauf der Phasen und RMS Werte beginnt. (Im gegebenen Fall scheint dies mit ca. 33,15 MHz zu beginnen)

Hieraus wurde der Schluss gezogen, dass im Bereich dieser Frequenz die Anpassung der Antenne zur Leitung wieder so schlecht wird, dass man damit beginnt, den Reflexionsfaktor zwischen Antenne und Leitung zu messen.

Ein kurzer Messdurchgang über einen Frequenzverlauf oberhalb der Resonanzfrequenz gab dann Aufschluss darüber, ob sich diese Theorie bestätigen lässt.

Dieser Messdurchgang ergab folgende Grafik:(Resonanzfrequenz der Antenne 32,5 MHz, Schrittweite 0,01 MHz)

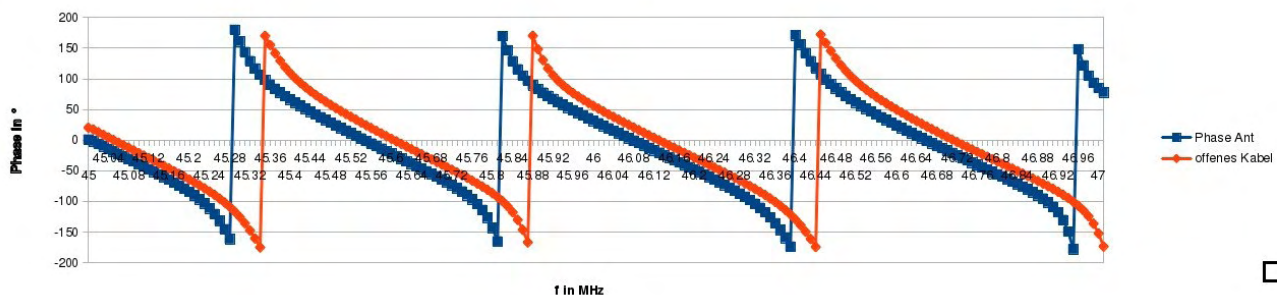


Abb.42 Verlauf Phase oberhalb Resonanzfrequenz

Wie man erkennt, erreicht man mit der Messung oberhalb der Resonanzfrequenz tatsächlich den erhofften Effekt.

Die Überlegungen die anschliessend zur Antennenkalibrierung angestellt wurden, basierten auf dieser Erkenntnis.

So schien es dann am meisten Sinn zu machen, die Reflektionsmessungen im Bereich zwischen 35 und 40 MHz durchzuführen, da die Bandpassfilter und Kabel das Signal oberhalb von 40 MHz zu stark abschwächen würden.

Man entschied sich dafür, die Reflektionsmessungen an den Antennen bei 40 MHz durchzuführen.

6.2 Auswertung Antennenkalibrierung

Von den in Kapitel 5.3.1 genannten Ansätzen hat sich nur der Letzte als einigermaßen praktikabel herausgestellt.

Dieser hat jedoch durchaus positive Ergebnisse geliefert. Die sich ergebenden Regressionsgeraden der unterschiedlichen Fußpunkthöhen ähneln sich an beiden Standorten sehr stark. Ebenso besteht Ähnlichkeit zwischen den Geraden der unterschiedlichen Standorte.

Auch die Blindtests, die bezüglich linearer Änderungen der Antenneninduktivität durchgeführt wurden, können als erfolgreich beschrieben werden.

Obwohl die Regressionsfunktionen an unterschiedlichen Tagen und an unterschiedlichen Orten ermittelt wurden, konnten mit ihrer Hilfe die sich an einem weiteren, unterschiedlichen Tag ergebenden Änderungen bei der Transmission auf bis zu 4° genau vorhergesagt werden. Dabei spielte es keine entscheidende Rolle welche der Regressionsfunktionen man benutzte. Allerdings trifft man die tatsächlichen Werte immer am sichersten mit dem Mittelwert aus allen 3 Regressionsgeraden eines Standorts.

Die Ergebnisse werden als Zeichen dafür gedeutet, dass es zumindest möglich sein dürfte am endgültigen Standort der Antennen Kalibrierfunktionen zu erstellen und Änderungen während der Transmission entsprechend dieser Funktionen, zumindest in einem kleinen Bereich von ca. $\pm 20^\circ$, zu kompensieren.

Es bleibt die Frage zu klären, inwiefern Temperaturschwankungen ähnliche Effekte hervorrufen wie es beim Erstellen der Kalibrierfunktionen simuliert wurde.

Die Untersuchungen bezüglich extremer Änderungen an den Antennen sehen zwar zunächst nicht ganz so positiv aus. Eine Näherer Betrachtung der Messwerte stellt diese jedoch in ein anderes Licht.

Zunächst ergibt die Veränderung eines Radials eine ausreichend gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Messwert.

Nach der Veränderung des zweiten Radials passen die Werte jedoch überhaupt nicht mehr zueinander.

Nach dem „zurücklegen“ der Radials stimmen die Werte jedoch wieder überein.

(Wobei „zurücklegen“ hier tatsächlich nur bedeutet, das Radial wurde, ohne die Intention die genau Lage wieder zu erreichen, grob wieder so auf das Gebüsch gelegt, wie es vor der Veränderung lag.)

Das gleiche gilt für ein extremes Verstellen des Fusspunktes, womit ein Herab-Rutschen der Antenne an ihrer Halterung simuliert werden sollte.

Auch hier wurde durch die extreme Veränderung ein Effekt verursacht, der sich nicht durch die Regressionsfunktion vorhersagen lies. Verstellte man den Fusspunkt aber beliebig auf eine etwas andere Position, so stimmten die Werte wieder überein.

Die abschliessende, tiefer gehende Untersuchung dieser Messungen brachte dann den Grund hierfür zu Tage.

Tatsächlich wiesen alle Messungen die überhaupt nicht mit der Regressionsfunktion übereinstimmten RMS Pegel von über 7V auf.

Durch diese Änderungen wurden die Antennencharakteristik also so stark geändert, dass das System mit der bestehenden Konfiguration übersteuert wurde.

Die anderen Messwerte weisen wiederum Pegel von 4 bis 5,5 V auf und stimmen relativ gut mit den Regressionsgeraden über ein.

Bis auf die Messung Nr.6 die bei Pegeln von ca. 6,1 V RMS um 9° abweichende Werte ergab.

Diese Zusammenhänge machen die Ergebnisse der extrem Tests tatsächlich eher zu positiven Ergebnissen. Da, obwohl die Antenne während der Tests teilweise extrem verstimmt war, die Regressionsgeraden nach grober, unkontrollierter Änderung des „Problemfaktors“ wieder glaubhafte Werte erzeugen.

Dabei wurden die Änderungen weiter auf den ganz zu Beginn eingemessenen Standard bezogen. Dieser blieb also weiterhin gültig, nachdem der extreme Fehler an der Antenne beseitigt war.

Die Ergebnisse dieser Blindtests wurden dahin gehend interpretiert, dass die Regressionsfunktionen auf extreme Änderungen angewendet werden können, wenn diese keinen zu starken Einfluss auf die Antennencharakteristik haben.

Das Ablösen eines Radials oder das verrutschen des Fusspunktes kann unter gewissen Umständen jedoch wieder kompensiert werden.

Dabei gibt es vor allem zwei Indizien die darauf hindeuten, dass ein aufgetretener Fehler eine zu starke Änderung der Antennencharakteristik verursacht hat:

- eine starke Veränderung des Empfangspegels einer Antenne
- Eine starke, sprunghafte Änderung der Phasenwerte bei den Reflexionsmessungen entlang eines Tages.(Temperaturbedingt müssten diese, wenn überhaupt, gleitend mit der Umgebungstemperatur schwanken)

Der letzte Blindtest mit stark veränderten Bodeneigenschaften unter der Antenne machte dann klar, dass es nicht möglich sein wird, Regressionsfunktionen in der Firma zu erstellen, die am Bestimmungsort der Antenne immer noch gültig sind.

Der veränderte Untergrund macht das Erstellen einer völlig neuen Regressionsfunktion nötig.

Um festzustellen ob dennoch ein linearer Zusammenhang zwischen den Änderungen besteht wurde, an einem unabhängigen Tag, an dem die Antennen zunächst wieder neu aufgebaut werden mussten, eine neue Regressionsfunktion erstellt und die Werte des Blindtests noch einmal mit dieser Regressionsfunktion untersucht.

Es ergab sich folgende Grafik:

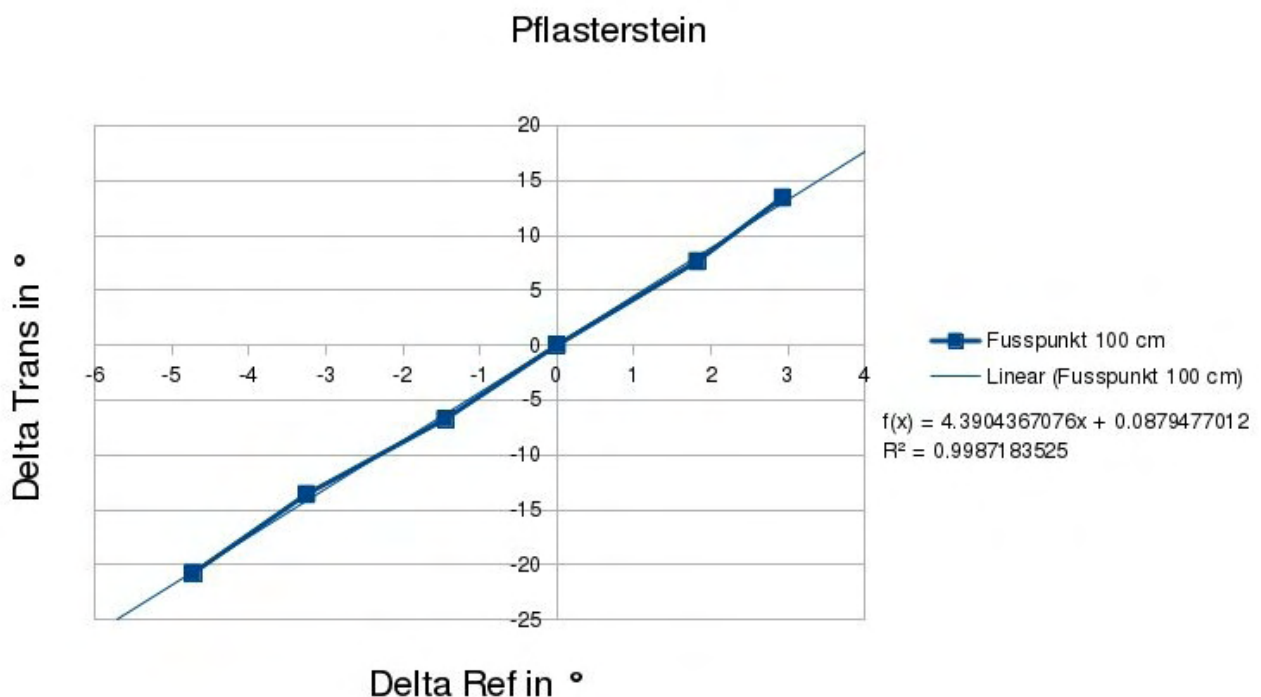


Abb.43 Regression Pflasterstein

Bearbeitet man nun die Messwerte des Blindtests zum geänderten Untergrund noch einmal mit dieser Regressionsfunktion erhält man folgende Auswertung:

StanTrans	17.928			
StanREf	81.881			
Blindtest(FP100)	Delta Ref	Delta Trans berechnet(100)	Trans gemessen	Trans berechnet
1	1.629	7.2399690979	26.93	25.1679690979
2	2.276	10.0805816477	30.156	28.0085816477
3	2.832	12.5216644571	31.668	30.4496644571
4	-0.544	-2.3004498677	16.89	15.6275501323
5	-3.544	-15.4717599905	2.862	2.4562400095

Abb.44 Auswertung neue Regression

Man sieht also, dass sich zwar die Koeffizienten der Regressionsfunktion in Abhängigkeit des Untergrunds stark verändern. Jedoch trotzdem eine lineare Regressionsfunktion aufgestellt werden kann um die Abhängigkeit der Änderungen zu beschreiben. Diese ist, wie alle der gezeigten Regressionsfunktionen, weiter gültig, so lange der Untergrund während der Blindtests dem Untergrund entspricht, der sich während der Aufnahme der Regressionsfunktion unterhalb der Antenne befand.

6.3 Abschlussbetrachtung und Ausblick

Anhand der Ergebnisse der Versuche zur Kabelkalibrierung über eine Reflexionsmessung wurde entschieden, dass es wohl das beste sein wird, bei den in näherer Zukunft anstehenden Installationen zunächst sowohl eine Kalibrierung über die Splitterbox als auch über Reflexionsmessungen durchzuführen und so im Verlauf weiterer, unabhängiger Feldversuche einen Überblick darüber zu bekommen ob die Methode tatsächlich immer wieder übereinstimmende Werte erzeugt.

Um dies für das einrichtende Personal zu vereinfachen wurde eine Software in Xojo© geschrieben.

Die Software gibt dem Benutzer hierbei während der Durchführung der Kalibrierung eine Schritt für Schritt Anleitung wann welche Kabel getauscht werden müssen. Speichert die erhaltenen Werte selbständig ab. Führt eine Mittelwert Bildung der Messwerte durch und ermittelt im selben Schritt die zufälligen Fehler die sich bei der Messung ergeben haben. Anschliessend werden die erhaltenen Werte in einer Listbox angezeigt, so dass der Benutzer nach erfolgter Durchführung der Kalibrierung für alle verwendeten Kanäle entscheiden kann, ob er die erhaltenen Werte für die spätere Verwendung in die Datei „calibration.wera“ speichern möchte oder nicht.

Eine Besprechung der verwendeten Hintergrundprozesse würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und bleibt deswegen aus.

Für die Antennenkalibrierung stellte sich heraus, dass lediglich das Erstellen einer Kalibrierfunktion als praktikable Methode in Frage kommt.

Diese muss jedoch am Bestimmungsort der Antenne erstellt werden, und sollte, mit der aufgezeigten Methode, nur auf kleinere Änderungen angewendet werden. Extreme

Änderungen, wie das Ablösen von Radials, können Effekte verursachen, die nicht zwangsläufig kompensiert werden können.

Weitere Untersuchungen sollten jetzt darauf abzielen, heraus zu bekommen, ob eine eventueller Zusammenhang zwischen den SWR der Antennenkonfigurationen auf den beiden Frequenzen und der Steigung der sich ergebenden Regressionsfunktion bestehen könnte.

Zu beachten gilt, dass über Reflexionsmessungen nicht ohne Weiteres festgestellt werden kann, ob die Veränderung des Phasengangs aufgrund eines Kabeldefektes oder durch veränderte Antenneneigenschaften verursacht wird.

Für das Aufspüren von Kabeldefekten bleibt nur die Möglichkeit der Längenbestimmung aus Kapitel 2.4. Hierfür müsste man entweder die Kabel von den Antennen trennen, oder bei sehr hohen Frequenzen messen.

Der Höhe der Messfrequenz sind jedoch durch die Receiver Input Filter Grenzen gesetzt.

Nahfeldeffekte können ebenfalls nicht kompensiert werden.

Grundsätzlich scheint es jedoch möglich zu sein, die Informationen der Reflexionsmessungen in einem definierten Bereich zur Optimierung der Messgenauigkeit zu nutzen, oder mit Hilfe von gespeicherten Daten Defekte im Kabel- Antennensystem zu registrieren.

Ich rate dazu, in nächster Zeit Informationen darüber zu sammeln, inwiefern sich die Temperaturschwankungen an den Installationsorten auf die Phasenwerte der Reflexionsmessungen auswirken. Sollten diese sich im Laufe der Tages- und Jahreszeiten nur in kleinen Bereichen von $\pm 2^\circ$ ändern, oder die Änderungen bei jeder Antenne innerhalb des Arrays zu jeder Zeit gleich stark auftreten, so kann auf die Suche nach einer geeigneten Kalibrierfunktion verzichtet werden. Die Werte die sich dadurch bei der Transmission ergeben schwanken dann zwar vermutlich stärker. Die bisherigen Messungen haben jedoch ergeben, dass diese Änderungen sich, je nach Untergrundbeschaffenheit, in einem Bereich von ca. 4° bis 8° bewegen dürften.

In diesem Fall könnten die gespeicherten Daten der Reflexionsmessungen jedoch trotzdem für das Aufspüren extremer Fehler benutzt werden.

Hier wäre zum Beispiel das Einrichten eines Messsystems mit dynamischen Grenzwert nach der Doppel-Sigma-Schlauch Methode denkbar. Dieses könnte dann eine Meldung absenden, falls die Werte der Reflexionsmessungen eine ungewöhnlich hohe, spontane Änderung erfahren haben.

Sind die temperaturbedingten Änderungen jedoch deutlich Höher als $\pm 2^\circ$, wird es zusätzlich nötig sein, sich Gedanken über die Entwicklung einer Methode zum Erstellen einer Kalibrierfunktion zu machen.

Vorstellbar wäre hier zum Beispiel einen weiteren, unabhängigen Tx Sender mit geringer Leistung in ausreichendem Abstand zum Rx Array zu installieren, mit dessen Hilfe immer wieder Transmissionsmessungen durchgeführt werden können um die Ergebnisse dieser Messungen mit anschließenden Reflexionsmessungen zu vergleichen und die Änderungen beider Werte mit der Umgebungstemperatur zu korrelieren.

Hierbei könnte man grob festlegen, dass Veränderungen bei der Transmission die keine Veränderungen bei der Reflexion verursacht haben vermutlich durch Störer in der Funkstrecke verursacht werden. Diese könnten zunächst vernachlässigt werden.

Sollte diese Störung über mehrere Proben entlang einer definierten Zeitperiode weiter bestehen, könnte man die neuen Werte dann als neuen Standard abspeichern und mit diesen Werten weiter arbeiten. Nur um sicher sein zu können, dass die bisher gewonnen Kalibrierdaten bezüglich der Änderungen beider Werte weiter angewendet werden können.

Ebenso im Bereich des Möglichen wäre der Einsatz von Schrittmotoren an den einstellbaren Induktivitäten. Unter der Voraussetzung, dass der Phasensprung des Reflexionsfaktors eindeutig einem Phasengang der Antenne zugeordnet werden kann, könnte man diese so einrichten, dass sie die Antenne auf Basis der Reflexionsmessungen immer so einstellen, dass diese Werte konstant bleiben. Extreme Änderungen oder Nahfeldeffekte an den Antennen können hierdurch jedoch auch nicht kompensiert werden.

In jedem Fall sollte, falls die Untersuchung ergeben hat, dass eine Antennenkalibrierung aufgrund von Temperaturschwankungen nötig ist, das Ziel der Antennenkalibrierung konsequent weiter verfolgt werden. Da nur so die Richtigkeit der angezeigten Messwerte garantiert werden könnte.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] - J.Detlefsen/U.Siart(2006), Oldenbourg Verlag, Grundlagen der Hochfrequenztechnik 2.Auflage
- [2] - A.Krischke(2001), DARC Verlag, Rothammels Antennenbuch, 12. aktualisiert Ausgabe
- [3] - M.L.Heron/A.Prytz(2003), OCEANS 2003. Proceedings, San Diego, „Performance of a VHF Ocean Radar in the Surf Zone“
- [4] - Oppermann(2009), FH Wedel, Diplomarbeit: „Automatic Calibration Unit“
- [5] - Dr.Klaus Werner Gurgel(13.4.2014), TU Hamburg Harburg, Telefongespräch
- [6] - <http://www.amateurfunk-wiki.de/index.php/Fu%C3%9Fpunktwide%20stand> 10.4.2014
- [7] - <http://www.ifac.ch/media/80.1.ifac.marconi-antenne.gif> 3.5.2014
- [8] - <http://www.dj4uf.de/lehrge/e11/Bild11-24.gif> 3.5.2014

8 Anhang

8.1 Aircell®7 Datenblatt



Aircell®7 - ultraflexible, low loss coaxial cable for radio communications

Aircell 7 is a ultraflexible coaxial cable designed for frequencies up to 6 GHz. At a diameter of just 7,3 mm (0.287" OD) and a minimum bending radius of just 25 mm, it offers relatively low loss. The low attenuation of Aircell 7 is achieved through advanced manufacturing techniques and the use of a PE-LLC dielectric with a foaming rate of more than 70%.

6.

The extreme flexibility of Aircell 7 is further enhanced through the use of a multi-stranded oxygen-free center conductor. Further advantages of this cable include the use of double shielding which is constructed of overlapping copperfoil plus an additional tightly woven copperbraid. The copperfoil has an applied PE-coating which prevents foil cracking due to short radius bends and the black PVC-sheath of Aircell 7 is UV-stabilized. A screening efficiency of > 85 dB @ 1GHz is realized. Aircell 7 is the right choice, when a super flexible, microwave rated cable is required. Aircell 7 is available from stock in the following standard drum sizes: 25 m, 50 m, 100 m, 200 m and 500 m.

Aircell®7 characteristics

Diameter	7,3 mm
Impedance	50
Attenuation @ 1 GHz/100 m.....	21,52 dB
fmax	6 GHz



Grounding Clamp for Aircell®7, Part.-No. 6811

© SSB-Electronic GmbH - Specifications are subject to change



www.ssb-electronic.com

Aircell®7

Technical data

Centre conductor	.....	stran, copper, oxy. free, 19 x 0,37 mm
Centre conductor Ø	.....	1,85 mm
Dielectric	.....	PE, low-loss compound
Dielectric Ø	.....	5,0 mm
Outer conductor 1	.....	copperfoil, PE-coated
Shielding factor	.....	100 %
Outer conductor 2	.....	copper braid
Shielding factor	.....	70 %
Sheath	.....	black PVC, UV-resistant
Outer diameter Ø	.....	7,3 mm
Weight	.....	72 g/m
Min. bending radius	..... one single bending	25 mm
	..... 15 repeated bendings	50 mm
Temperature range	.....	-30 bis +80°C
Pulling strength	.....	2 daN

Typ. attenuation (dB/100 m @ 20°C)

5 MHz	.....	1,6	1000 MHz	.....	21,52
10 MHz	.....	2,2	1296 MHz	.....	24,84
50 MHz	.....	4,52	1500 MHz	.....	27,08
100 MHz	.....	6,28	1800 MHz	.....	30,0
144 MHz	.....	7,6	2000 MHz	.....	31,88
200 MHz	.....	9,04	2400 MHz	.....	35,6
300 MHz	.....	11,2	3000 MHz	.....	40,88
432 MHz	.....	13,6	4000 MHz	.....	49,12
500 MHz	.....	14,72	5000 MHz	.....	57,04
800 MHz	.....	19,0	6000 MHz	.....	64,9

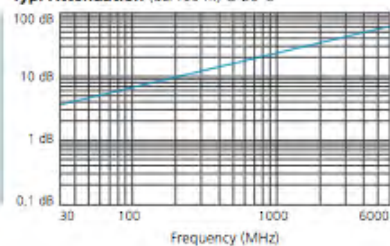
Max. power handling (W @ 40°C)

10 MHz	.....	2040	1000 MHz	.....	180
100 MHz	.....	620	2000 MHz	.....	120
500 MHz	.....	260	3000 MHz	.....	90

Electrical specifications

Impedance	.....	50
Capacity	.....	75 pF/m
Velocity factor	.....	0,83
fmax	.....	6 GHz
Screening efficiency @ 1 GHz	.....	83 dB
DC-resistance	.....
Centre conductor	.....	8,6 /km
Outer conductor	.....	8,5 /km
RF peak voltage	.....	0,7kV

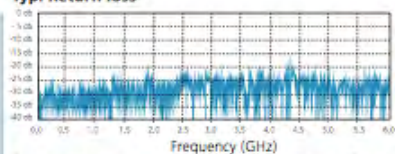
Typ. Attenuation (dB/100 m) @ 20°C



Aircell 7 RG 213/U RG 58/U

Capacity	.....	75 pF/m	.....	101 pF/m	.....	102 pF/m
Velocity factor	.....	0,83	.....	0,66	.....	0,66
Attenuation (dB/100 m)						
10 MHz	.....	2,2	.....	2,0	.....	5,0
100 MHz	.....	6,28	.....	7,0	.....	17,0
500 MHz	.....	14,72	.....	17,0	.....	39,0
1000 MHz	.....	21,52	.....	22,5	.....	54,6
3000 MHz	.....	40,88	.....	58,5	.....	118

Typ. Return loss



Due to production tolerances the RTL may have different characteristics.

8.2 Antennenbauplan

Anleitung:	Fertigungsanleitung	HELZEL®
Projekt:	WERA – Antenne	Antenne - 6.0

<p>Schaltung für Antenna „tuning and matching“</p> <p>L1: CoilCraft Typ 143 oder 144 mit oder ohne Schirm</p> <p>L2: Option, Serien-L für niedrige Frequenzen (sonst Drahtbrücke)</p> <p>L3: Ableitung von statischer Spannung, Wert > 10 x L1</p> <p>C1: Koppel-C (12n)</p> <p>C2: Option, für Resonanzabgleich</p>	<p>Alle Bauteile auf die gleiche Seite, ebenso wie die Anschlüsse für Antenne und Koax-Kabel</p>

1. Platine nach aktuellen Bestückungsplan bestücken.

<p>Siehe Stückliste</p>	<p>Kabel ID 78 (1mm²) auf 1cm abisolieren. Aderenhülle ID 1025 aufsetzen</p>
-------------------------	---

Dokument:	/media/WIN/Antennenspule_neu/WERA-Antenne-FA-V6-140131.doc	Version 6.0
Anlage:	Fotos	08.05.14
Freigegeben:		Seite 1 von 6

8.3 Messwerte Feldversuch

Reflexion mit offenem Kabelende:

Kabel1 - Kabel2				Kabel1 - Kabel3			
RefOff	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °	RefOff	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °
1	68,789	-69,103	34,473	1	63,159	-71,003	33,5405
2	68,808	-69,073	34,47025	2	63,158	-71,005	33,54075
3	68,803	-69,08	34,47075	3	63,159	-71,043	33,5505
4	68,802	-69,089	34,47275	4	63,162	-71,051	33,55325
5	68,793	-69,1	34,47325	5	63,155	-70,996	33,53775
6	68,788	-69,081	34,46725	6	63,155	-71,03	33,54625
7	68,811	-69,102	34,47825	7	63,165	-71,042	33,55175
8	68,802	-69,101	34,47575	8	63,163	-71,021	33,546
9	68,797	-69,101	34,4745	9	63,158	-71,01	33,542
10	68,793	-69,092	34,47125	10	63,165	-71,004	33,54225
Mittel	68,7986	-69,0922	34,4727	Mittel	63,1599	-71,0205	33,5451

Kanal1 - Kanal2				Kanal1 - Kanal3			
RefOff	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 + Ref2)/2 in °	RefOff	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 + Ref2)/2 in °
1	68,789	-69,103	-0,157	1	63,159	-71,003	-3,922
2	68,808	-69,073	-0,1325	2	63,158	-71,005	-3,9235
3	68,803	-69,08	-0,1385	3	63,159	-71,043	-3,942
4	68,802	-69,089	-0,1435	4	63,162	-71,051	-3,9445
5	68,793	-69,1	-0,1535	5	63,155	-70,996	-3,9205
6	68,788	-69,081	-0,1465	6	63,155	-71,03	-3,9375
7	68,811	-69,102	-0,1455	7	63,165	-71,042	-3,9385
8	68,802	-69,101	-0,1495	8	63,163	-71,021	-3,929
9	68,797	-69,101	-0,152	9	63,158	-71,01	-3,926
10	68,793	-69,092	-0,1495	10	63,165	-71,004	-3,9195
Mittel	68,7986	-69,0922	-0,1468	Mittel	63,1599	-71,0205	-3,9303

Kabel1 - Kabel4			
RefOff	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °
1	63,748	-49,514	28,3155
2	63,747	-49,525	28,318
3	63,741	-49,552	28,32325
4	63,754	-49,546	28,325
5	63,748	-49,537	28,32125
6	63,74	-49,549	28,32225
7	63,745	-49,551	28,324
8	63,734	-49,55	28,321
9	63,731	-49,56	28,32275
10	63,722	-49,55	28,318
Mittel	63,741	-49,5434	28,3211

Kanal1 - Kanal4			
RefOff	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 + Ref2)/2 in °
1	63,748	-49,514	7,117
2	63,747	-49,525	7,111
3	63,741	-49,552	7,0945
4	63,754	-49,546	7,104
5	63,748	-49,537	7,1055
6	63,74	-49,549	7,0955
7	63,745	-49,551	7,097
8	63,734	-49,55	7,092
9	63,731	-49,56	7,0855
10	63,722	-49,55	7,086
Mittel	63,741	-49,5434	7,0988

Reflexion mit angeschlossener Antenne:

RefAnt	Antenne1 - Antenne2		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1-Ref2)/2 in °
1	-34,474	-16,758	-8,858
2	-34,502	-16,741	-8,8805
3	-34,485	-16,743	-8,871
4	-34,507	-16,777	-8,865
5	-34,459	-16,76	-8,8495
6	-34,447	-16,752	-8,8475
7	-34,439	-16,743	-8,848
8	-34,442	-16,755	-8,8435
9	-34,454	-16,755	-8,8495
10	-34,495	-16,77	-8,8625
Mittelwert	-34,4704	-16,7554	-8,8575

RefAnt	Kabel1 - Kabel2		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °
1	-30,608	6,729	-9,33425
2	-30,417	6,658	-9,26875
3	-30,55	6,726	-9,319
4	-30,412	6,78	-9,298
5	-30,369	6,811	-9,295
6	-30,409	6,839	-9,312
7	-30,432	6,76	-9,298
8	-30,415	6,773	-9,297
9	-30,387	6,805	-9,298
10	-30,335	6,804	-9,28475
Mittel	-30,4334	6,7685	-9,300475

RefAnt	Kanal1 - Kanal2		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 + Ref2)/2 in °
1	-31,512	40,038	4,263
2	-31,503	39,926	4,2115
3	-31,437	39,92	4,2415
4	-31,447	39,972	4,2625
5	-31,442	39,974	4,266
6	-31,47	39,941	4,2355
7	-31,421	39,91	4,2445
8	-31,401	39,92	4,2595
9	-31,412	39,823	4,2055
10	-31,422	39,845	4,2115
Mittel	-31,4467	39,9269	4,2401

RefAnt	Antenne1 - Antenne3		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/2 in °
1	-24,93	4,204	-14,567
2	-24,917	4,193	-14,555
3	-24,913	4,248	-14,5805
4	-24,926	4,226	-14,576
5	-24,926	4,19	-14,558
6	-24,92	4,229	-14,5745
7	-24,92	4,208	-14,564
8	-24,896	4,218	-14,557
9	-24,901	4,224	-14,5625
10	-24,891	4,22	-14,5555
Mittel	-24,914	4,216	-14,565

RefAnt	Kabel1 - Kabel3		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °
1	-25,931	-3,369	-5,6405
2	-25,883	-3,344	-5,63475
3	-25,808	-3,316	-5,623
4	-25,857	-3,339	-5,6295
5	-25,853	-3,331	-5,6305
6	-25,84	-3,337	-5,62575
7	-25,829	-3,338	-5,62275
8	-25,853	-3,346	-5,62675
9	-25,788	-3,361	-5,60675
10	-25,792	-3,343	-5,61225
Mittel	-25,8434	-3,3424	-5,62525

RefAnt	Kanal1 - Kanal3		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 + Ref2)/2 in °
1	-27,612	26,895	-0,3585
2	-27,561	26,95	-0,3055
3	-27,539	26,83	-0,3545
4	-27,565	26,902	-0,3315
5	-27,559	26,89	-0,3345
6	-27,547	26,907	-0,32
7	-27,567	26,901	-0,333
8	-27,549	26,85	-0,3495
9	-27,563	26,858	-0,3525
10	-27,557	26,87	-0,3435
Mittel	-27,5619	26,8853	-0,3383

RefAnt	Antenne1 - Antenne4			RefAnt	Kabel1 - Kabel4		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/2 in °		Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 - Ref2)/4 in °
1	-31,519	-24,736	-3,3915	1	-30,905	73,38	-26,07125
2	-31,593	-24,804	-3,3945	2	-30,399	73,45	-25,96225
3	-31,583	-24,732	-3,4255	3	-30,453	73,392	-25,96125
4	-31,559	-24,747	-3,406	4	-30,383	73,735	-26,0295
5	-31,567	-24,765	-3,401	5	-30,435	73,547	-25,9955
6	-31,52	-24,846	-3,337	6	-30,413	73,566	-25,99475
7	-31,562	-24,787	-3,3875	7	-30,399	73,572	-25,99275
8	-31,559	-24,81	-3,3745	8	-30,448	73,59	-26,0095
9	-31,568	-24,811	-3,3785	9	-30,44	73,657	-26,02425
10	-31,576	-24,791	-3,3925	10	-30,441	73,631	-26,018
Mittel	-31,5606	-24,7829	-3,38885	Mittel	-30,4716	73,552	-26,0059

RefAnt	Kanal1 - Kanal4		
	Ref1 in °	Ref2 in °	(Ref1 + Ref2)/2 in °
1	-36,327	80,825	22,249
2	-36,201	80,84	22,3195
3	-36,252	80,909	22,3285
4	-36,091	80,362	22,1355
5	-36,154	80,94	22,393
6	-36,154	80,994	22,42
7	-36,103	81,001	22,449
8	-36,11	80,934	22,412
9	-36,101	80,498	22,1985
10	-36,1	80,383	22,1415
Mittel	-36,1593	80,7686	22,30465

Transmission über Splitterbox:

TransSplit	Kabel1 - Kabel2			TransSplit	Kabel1 - Kabel3		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2) in °		Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °
1	37,707	-41,94	39,8235	1	37,299	-40,363	38,831
2	37,71	-41,938	39,824	2	37,303	-40,366	38,8345
3	37,708	-41,942	39,825	3	37,302	-40,364	38,833
4	37,708	-41,94	39,824	4	37,301	-40,366	38,8335
5	37,707	-41,942	39,8245	5	37,301	-40,367	38,834
6	37,705	-41,941	39,823	6	37,302	-40,366	38,834
7	37,706	-41,941	39,8235	7	37,303	-40,367	38,835
8	37,706	-41,942	39,824	8	37,303	-40,367	38,835
9	37,709	-41,942	39,8255	9	37,305	-40,367	38,836
10	37,709	-41,943	39,826	10	37,305	-40,368	38,8365
Mittelwert	37,7075	-41,9411	39,8243	Mittelwert	37,3024	-40,3661	38,83425

TransSplit	Kanal1 - Kanal2			TransSplit	Kanal1 - Kanal3		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 + Trans2)/2 in °		Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 + Trans2)/2 in °
1	37,743	-41,576	-1,9165	1	37,319	-41,672	-2,1765
2	37,745	-41,582	-1,9185	2	37,317	-41,674	-2,1785
3	37,744	-41,58	-1,918	3	37,317	-41,673	-2,178
4	37,741	-41,581	-1,92	4	37,317	-41,674	-2,1785
5	37,742	-41,583	-1,9205	5	37,315	-41,67	-2,1775
6	37,741	-41,584	-1,9215	6	37,314	-41,672	-2,179
7	37,741	-41,581	-1,92	7	37,315	-41,672	-2,1785
8	37,742	-41,583	-1,9205	8	37,314	-41,672	-2,179
9	37,741	-41,583	-1,921	9	37,314	-41,672	-2,179
10	37,742	-41,585	-1,9215	10	37,317	-41,671	-2,177
Mittelwert	37,7422	-41,5818	-1,9198	Mittel	37,3159	-41,6722	-2,17815

TransSplit	Kabel1 - Kabel4		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °
1	34,594	-34,031	34,3125
2	34,592	-34,033	34,3125
3	34,593	-34,035	34,314
4	34,593	-34,031	34,312
5	34,593	-34,034	34,3135
6	34,592	-34,034	34,313
7	34,592	-34,034	34,313
8	34,592	-34,034	34,313
9	34,592	-34,035	34,3135
10	34,593	-34,035	34,314
Mittelwert	-34,0336	-34,0336	34,3131

TransAnt	Kanal1 - Kanal4		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 + Trans2)/2 in °
1	34,594	-35,686	-0,546
2	34,592	-35,701	-0,5545
3	34,593	-35,693	-0,55
4	34,593	-35,71	-0,5585
5	34,593	-35,703	-0,555
6	34,592	-35,703	-0,5555
7	34,592	-35,704	-0,556
8	34,592	-35,707	-0,5575
9	34,592	-35,707	-0,5575
10	34,593	-35,71	-0,5585
Mittel	34,5926	-35,7024	-0,5549

Transmission über Antennen:

TransAnt	Antenne1 - Antenne2			TransAnt	Kabel1 - Kabel2		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °		Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °
1	15,934	59,964	-22,015	1	16,656	-64,515	40,5855
2	15,984	60,08	-22,048	2	16,733	-65,43	41,0815
3	16,082	59,965	-21,9415	3	16,582	-65,577	41,0795
4	16,034	59,937	-21,9515	4	16,776	-65,458	41,117
5	15,609	59,882	-22,1365	5	16,742	-65,48	41,111
6	16,02	59,91	-21,945	6	16,71	-65,423	41,0665
7	16,007	59,897	-21,945	7	16,676	-65,48	41,078
8	15,941	59,954	-22,0065	8	16,428	-65,512	40,97
9	16,054	59,881	-21,9135	9	16,976	-65,498	41,237
10	15,997	59,88	-21,9415	10	16,693	-65,606	41,1495
Mittelwert	15,9662	59,935	-21,9844	Mittelwert	16,6972	-65,3979	41,04755

TransAnt	Kanal1 - Kanal2		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 + Trans2)/2 in °
1	16,252	-19,914	-1,831
2	16,663	-20,316	-1,8265
3	16,645	-20,251	-1,803
4	16,595	-20,401	-1,903
5	16,632	-20,41	-1,889
6	16,646	-20,344	-1,849
7	16,557	-20,38	-1,9115
8	16,61	-20,415	-1,9025
9	16,631	-20,491	-1,93
10	16,611	-20,401	-1,895
Mittelwert	16,5842	-20,3323	-1,87405

TransAnt	Antenne1 - Antenne3		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2) in °
1	-8,603	80,952	-44,7775
2	-8,227	80,815	-44,521
3	-8,221	80,892	-44,5565
4	-8,853	81,035	-44,944
5	-8,447	81,091	-44,769
6	-8,014	80,939	-44,4765
7	-8,236	80,872	-44,554
8	-8,403	80,659	-44,531
9	-9,267	80,544	-44,9055
10	-8,463	81,639	-45,051
Mittelwert	-8,4734	80,9438	-44,7086

TransAnt	Kabel1 - Kabel3		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2) in °
1	-6,987	-86,474	39,7435
2	-6,865	-86,495	39,815
3	-6,516	-86,487	39,9855
4	-6,534	-86,465	39,9655
5	-6,619	-86,498	39,9395
6	-6,56	-86,38	39,91
7	-6,489	-86,428	39,9695
8	-6,554	-86,519	39,9825
9	-6,695	-86,49	39,8975
10	-6,561	-86,514	39,9765
Mittelwert	-6,638	-86,475	39,9185

TransAnt	Kanal1 - Kanal3		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 + Trans2)/2 in °
1	-7,92	3,508	-2,206
2	-7,759	3,85	-1,9545
3	-8,817	3,153	-2,832
4	-7,726	3,138	-2,294
5	-7,804	3,147	-2,3285
6	-7,756	3,11	-2,323
7	-7,749	3,19	-2,2795
8	-7,777	3,149	-2,314
9	-7,779	3,204	-2,2875
10	-7,928	3,076	-2,426
Mittelwert	-7,9015	3,2525	-2,3245

TransAnt	Antenne1 - Antenne4		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °
1	-33,54	101,262	-67,401
2	-33,778	101,289	-67,5335
3	-34,201	101,234	-67,7175
4	-33,247	101,307	-67,277
5	-33,966	101,236	-67,601
6	-33,364	101,335	-67,3495
7	-33,845	101,121	-67,483
8	-33,478	101,175	-67,3265
9	-33,992	101,214	-67,603
10	-33,402	101,283	-67,3425
Mittelwert	-33,6813	101,2456	-67,46345

TransAnt	Kabel1 - Kabel4		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 - Trans2)/2 in °
1	-31,931	-101,617	34,843
2	-31,922	-101,134	34,606
3	-31,057	-101,484	35,2135
4	-31,707	-101,191	34,742
5	-31,149	-101,36	35,1055
6	-31,649	-101,427	34,889
7	-31,657	-101,361	34,852
8	-31,58	-101,365	34,8925
9	-31,67	-101,503	34,9165
10	-31,478	-101,717	35,1195
Mittelwert	-31,58	-101,4159	34,91795

TransAnt	Kanal1 - Kanal4		
	Trans1 in °	Trans2 in °	(Trans1 + Trans2)/2 in °
1	-33,247	32,681	-0,283
2	-33,323	32,221	-0,551
3	-33,259	32,205	-0,527
4	-33,659	32,25	-0,7045
5	-33,225	32,224	-0,5005
6	-33,419	32,867	-0,276
7	-33,289	32,081	-0,604
8	-33,144	32,257	-0,4435
9	-33,427	32,23	-0,5985
10	-33,605	32,302	-0,6515
Mittelwert	-33,3597	32,3318	-0,51395

8.4 Messwerte Regressionen Standort 1 und 2

Standort 1:

Fußpunkthöhe 60 cm:

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	-48,151	-39,305	-30,623	-24,299	-16,829	-9,153	-1,181
32,5	-48,227	-39,473	-30,695	-24,26	-16,833	-9,098	-1,067
32,5	-47,86	-39,487	-30,569	-24,19	-16,922	-9,037	-1,024
32,5	-48,334	-39,534	-30,586	-24,088	-16,861	-9,032	-1,246
32,5	-48,414	-39,364	-30,311	-24,021	-17,051	-8,977	-0,864
32,5	-48,336	-38,897	-30,613	-24,017	-17,094	-8,963	0,195
32,5	-48,328	-39,298	-30,673	-24,11	-17,175	-9,042	-1,771
32,5	-48,37	-39,335	-30,516	-24,089	-16,846	-8,934	2,016
32,5	-48,398	-39,381	-30,629	-24,124	-16,761	-8,945	-2,365
32,5	-48,445	-39,366	-30,564	-24,085	-17,206	-8,897	-2,416
Mid	-48,2863	-39,344	-30,5779	-24,1283	-16,9578	-9,0078	-0,9723
Var	0,17353005	0,1760587	0,10751687	0,09403788	0,15988246	0,07919708	1,29512625
Delta	-24,158	-15,2157	-6,4496	0	7,1705	15,1205	23,156

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	83,037	86,211	88,637	91,368	96,075	100,699	104,272
40	82,96	86,208	88,553	91,287	96,096	100,619	104,301
40	82,946	86,175	88,57	91,417	96,106	100,65	104,271
40	82,977	86,146	88,62	91,433	96,168	100,686	104,316
40	82,948	86,256	88,565	91,486	96,126	100,677	104,156
40	82,942	86,203	88,54	91,497	96,148	100,65	104,14
40	83,013	86,3	88,548	91,535	96,174	100,63	104,197
40	82,968	86,226	88,595	91,562	96,15	100,633	104,216
40	82,997	86,234	88,569	91,629	96,19	100,657	104,228
40	83,026	86,283	88,567	91,607	96,227	100,681	104,17
Mid	82,9814	86,2242	88,5764	91,4821	96,146	100,6582	104,2267
Var	0,03480166	0,04682782	0,0314685	0,10766765	0,04633933	0,02669498	0,06167847
Delta	-8,5007	-5,2579	-2,9057	0	4,6639	9,1761	12,7446

- Legende:* *fr* - Resonanzfrequenz der Antenne
fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz die für die Messung verwendet wurde)
Mid - Mittelwert
Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei $fr = 32,5$ MHz

Fußpunkthöhe 80 cm:

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	-43,859	-39,103	-31,005	-24,404	-17,444	-9,054	-1,645
32,5	-43,926	-39,086	-30,985	-24,585	-17,039	-8,977	-1,636
32,5	-44,024	-39,146	-31,078	-24,502	-17,008	-8,581	-1,538
32,5	-44,175	-39,044	-30,976	-24,552	-16,719	-9,319	-1,537
32,5	-43,991	-39,121	-31,219	-24,509	-16,568	-8,82	-1,719
32,5	-44,289	-39,09	-30,936	-24,679	-16,576	-8,563	-1,91
32,5	-43,854	-39,042	-30,965	-24,631	-16,774	-8,554	-1,655
32,5	-43,742	-38,983	-31,127	-24,652	-16,837	-8,454	-2,041
32,5	-43,637	-39,075	-31,223	-24,388	-16,796	-8,491	-2,038
32,5	-43,534	-39,061	-31,345	-24,241	-16,833	-8,491	-1,651
Mid	-43,9031	-39,0751	-31,0859	-24,5143	-16,8594	-8,7304	-1,737
Var	0,23167719	0,04594308	0,13795607	0,13707909	0,25680697	0,29673939	0,19022092
Delta	-19,3888	-14,5608	-6,5716	0	7,6549	15,7839	22,7773

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	79,03	80,908	83,206	85,686	88,182	91,671	95,083
40	79,147	80,895	83,235	85,44	88,094	91,712	95,077
40	79,073	80,895	83,225	85,654	88,193	91,687	95,077
40	79,181	80,904	83,244	85,427	88,296	91,703	95,074
40	79,155	80,932	83,248	85,474	88,273	91,725	95,071
40	79,144	80,932	83,269	85,43	88,25	91,71	95,091
40	79,16	80,951	83,287	85,439	88,291	91,756	95,09
40	79,198	80,968	83,262	85,445	88,309	91,695	95,097
40	79,205	80,96	83,283	85,417	88,312	91,692	95,077
40	79,206	80,988	83,302	85,434	88,342	91,654	95,088
Mid	79,1499	80,9333	83,2561	85,4846	88,2542	91,7005	95,0825
Var	0,05766272	0,03275854	0,03003868	0,09912753	0,0761195	0,02833627	0,00859263
Delta	-6,3347	-4,5513	-2,2285	0	2,7696	6,2159	9,5979

- Legende: *fr* - Resonanzfrequenz der Antenne
fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz die für die Messung verwendet wurde)
Mid - Mittelwert
Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei $fr = 32,5$ MHz

Fußpunkthöhe 100 cm:

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	-44,937	-37,475	-29,888	-21,688	-18,26	-8,814	-2,088
32,5	-44,899	-37,58	-29,941	-21,537	-18,067	-8,793	-0,005
32,5	-45,007	-37,076	-29,815	-21,685	-18,198	-8,91	-2,008
32,5	-44,959	-37,319	-29,779	-21,672	-18,378	-8,787	-1,997
32,5	-44,922	-37,655	-29,967	-21,86	-18,38	-8,738	-2,305
32,5	-44,898	-37,398	-30,101	-21,698	-18,282	-8,704	-2,178
32,5	-44,822	-37,547	-29,998	-21,651	-18,415	-8,504	-2,126
32,5	-44,9	-38,045	-29,996	-21,591	-18,379	-8,368	-2,336
32,5	-45,194	-38,045	-30,058	-21,644	-18,288	-8,348	-2,092
32,5	-45,223	-38,271	-30,093	-21,58	-18,303	-8,262	-1,931
Mid	-44,9761	-37,6411	-29,9636	-21,6606	-18,295	-8,6228	-1,9066
Var	0,13153998	0,37202134	0,11013345	0,08795226	0,10459977	0,2308351	0,68046654
Delta	-23,3155	-15,9805	-8,303	0	3,3656	13,0378	19,754

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	76,727	78,841	80,921	83,031	85,148	88,96	92,047
40	76,772	78,971	80,9	83,033	85,157	88,946	92,046
40	76,779	78,863	80,927	83,013	85,148	88,971	92,027
40	76,799	78,935	80,902	83,046	85,179	88,961	92,053
40	76,809	78,86	80,925	83,042	85,293	88,968	92,042
40	76,799	78,836	80,945	83,064	85,097	88,963	92,056
40	76,804	78,805	80,931	83,044	85,197	89,007	92,069
40	76,809	78,85	80,924	83,085	85,193	88,963	91,98
40	76,824	78,819	80,942	82,956	85,213	88,935	92,064
40	76,807	78,801	80,906	82,93	85,19	88,965	92,022
Mid	76,7929	78,8581	80,9223	83,0244	85,1815	88,9639	92,0406
Var	0,02759811	0,05491701	0,01559238	0,04742058	0,05148948	0,01857986	0,02586375
Delta	-6,2315	-4,1663	-2,1021	0	2,1571	5,9395	9,0162

- Legende:* fr - Resonanzfrequenz der Antenne
 fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz die für die Messung verwendet wurde)
 Mid - Mittelwert
 Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei fr = 32,5 MHz

Standort 2:

Fußpunkthöhe 60 cm:

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	116,734	130,705	136,857	145,579	150,446	157,935	165,554
32,5	117,466	143,227	136,569	145,612	150,486	157,923	165,468
32,5	117,484	130,62	136,556	145,586	150,671	157,533	165,599
32,5	117,385	143,358	136,514	145,61	150,58	158,119	165,52
32,5	117,395	130,379	136,607	145,673	150,528	157,755	165,62
32,5	117,451	142,964	136,522	145,663	150,525	156,955	165,682
32,5	117,441	130,687	136,286	145,677	150,573	157,88	165,82
32,5	117,463	130,668	136,014	145,618	150,716	158,153	165,521
32,5	117,786	130,372	136,005	145,573	150,691	157,863	165,618
32,5	117,722	130,382	136,295	146,045	150,518	156,528	165,643
Mid	117,4327	134,3362	136,4225	145,6636	150,5734	157,6644	165,6045
Var	0,27997145	6,10697462	0,27007293	0,13933828	0,09133358	0,52615401	0,09982012
Delta	-28,2309	-11,3274	-9,2411	0	4,9098	12,0008	19,9409

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	79,557	81,67	83,897	87,22	90,157	94,223	98,176
40	79,55	81,669	83,884	87,23	90,142	94,205	98,131
40	79,534	81,674	83,932	87,233	90,193	94,215	98,189
40	79,538	81,664	83,904	87,217	90,159	94,177	98,175
40	79,524	81,657	83,909	87,232	90,178	94,208	98,063
40	79,54	81,68	83,912	87,191	90,161	94,233	98,137
40	79,55	81,681	83,917	87,234	90,207	94,211	98,154
40	79,568	81,689	83,926	87,249	90,153	94,248	98,184
40	79,533	81,679	83,922	87,263	90,202	94,185	98,202
40	79,492	81,667	83,898	87,274	90,181	94,241	98,183
Mid	79,5386	81,673	83,9101	87,2343	90,1733	94,2146	98,1594
Var	0,02082306	0,00945163	0,01476821	0,02361755	0,02221636	0,02275571	0,04082809
Delta	-7,6957	-5,5613	-3,3242	0	2,939	6,9803	10,9251

- Legende:* *fr* - Resonanzfrequenz der Antenne
fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz, die für die Messung verwendet wurde)
Mid - Mittelwert
Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz, des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei $fr = 32,5$ MHz

Fußpunkthöhe 80 cm:

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	122,634	129,656	136,954	143,207	151,696	158,344	166,487
32,5	122,752	129,626	136,804	143,925	151,592	158,378	166,425
32,5	122,734	129,69	136,818	143,399	151,728	158,343	166,681
32,5	122,771	129,611	136,897	143,446	151,6	158,363	166,475
32,5	122,802	129,494	137,044	143,406	151,63	158,191	166,498
32,5	122,751	129,493	137,043	143,372	151,634	158,278	166,575
32,5	122,937	129,457	136,998	143,489	151,597	158,215	166,549
32,5	122,753	129,526	137,034	143,46	151,739	158,259	167,102
32,5	122,842	129,546	137,052	143,835	151,64	158,294	166,535
32,5	122,866	129,738	136,972	143,873	151,747	158,308	166,778
Mid	122,7842	129,5837	136,9616	143,5412	151,6603	158,2973	166,6105
Var	0,08304189	0,09424914	0,09306652	0,24515564	0,06137146	0,06248209	0,20166543
Delta	-20,757	-13,9575	-6,5796	0	8,1191	14,7561	23,0693

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	78,178	80,286	82,665	84,497	87,116	89,717	93,443
40	78,126	80,297	82,657	84,397	87,141	89,693	93,424
40	78,178	80,294	82,664	84,445	87,136	89,748	93,42
40	78,185	80,362	82,654	84,427	87,181	89,747	93,432
40	78,199	80,299	82,697	84,399	87,136	89,752	93,45
40	78,187	80,317	82,689	84,404	87,156	89,76	93,483
40	78,206	80,298	82,669	84,387	87,179	89,741	93,479
40	78,215	80,344	82,667	84,385	87,184	89,772	93,482
40	78,162	80,343	82,687	84,391	87,175	89,769	93,465
40	78,2	80,367	82,684	84,376	87,192	89,789	93,491
Mid	78,1836	80,3207	82,6733	84,4108	87,1596	89,7488	93,4569
Var	0,02550468	0,03049244	0,0147652	0,03662664	0,02601367	0,02766386	0,02652651
Delta	-6,2272	-4,0901	-1,7375	0	2,7488	5,338	9,0461

- Legende: fr - Resonanzfrequenz der Antenne
 fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz die für die Messung verwendet wurde)
 Mid - Mittelwert
 Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei fr = 32,5 MHz

Fusspunkthöhe 100 cm:

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	-44,937	-37,475	-29,888	-21,688	-18,26	-8,814	-2,088
32,5	-44,899	-37,58	-29,941	-21,537	-18,067	-8,793	-0,005
32,5	-45,007	-37,076	-29,815	-21,685	-18,198	-8,91	-2,008
32,5	-44,959	-37,319	-29,779	-21,672	-18,378	-8,787	-1,997
32,5	-44,922	-37,655	-29,967	-21,86	-18,38	-8,738	-2,305
32,5	-44,898	-37,398	-30,101	-21,698	-18,282	-8,704	-2,178
32,5	-44,822	-37,547	-29,998	-21,651	-18,415	-8,504	-2,126
32,5	-44,9	-38,045	-29,996	-21,591	-18,379	-8,368	-2,336
32,5	-45,194	-38,045	-30,058	-21,644	-18,288	-8,348	-2,092
32,5	-45,223	-38,271	-30,093	-21,58	-18,303	-8,262	-1,931
Mid	-44,9761	-37,6411	-29,9636	-21,6606	-18,295	-8,6228	-1,9066
Var	0,13153998	0,37202134	0,11013345	0,08795226	0,10459977	0,2308351	0,68046654
Delta	-23,3155	-15,9805	-8,303	0	3,3656	13,0378	19,754

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	76,727	78,841	80,921	83,031	85,148	88,96	92,047
40	76,772	78,971	80,9	83,033	85,157	88,946	92,046
40	76,779	78,863	80,927	83,013	85,148	88,971	92,027
40	76,799	78,935	80,902	83,046	85,179	88,961	92,053
40	76,809	78,86	80,925	83,042	85,293	88,968	92,042
40	76,799	78,836	80,945	83,064	85,097	88,963	92,056
40	76,804	78,805	80,931	83,044	85,197	89,007	92,069
40	76,809	78,85	80,924	83,085	85,193	88,963	91,98
40	76,824	78,819	80,942	82,956	85,213	88,935	92,064
40	76,807	78,801	80,906	82,93	85,19	88,965	92,022
Mid	76,7929	78,8581	80,9223	83,0244	85,1815	88,9639	92,0406
Var	0,02759811	0,05491701	0,01559238	0,04742058	0,05148948	0,01857986	0,02586375
Delta	-6,2315	-4,1663	-2,1021	0	2,1571	5,9395	9,0162

- Legende:* fr - Resonanzfrequenz der Antenne
 fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz die für die Messung verwendet wurde)
 Mid - Mittelwert
 Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei fr = 32,5 MHz

8.5 Messwerte Regression Pflasterstein

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Trans	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
32,5	-74,683	-67,538	-60,238	-53,874	-46,299	-41,114	-1,181
32,5	-74,643	-67,58	-60,721	-53,969	-46,19	-40,226	-1,067
32,5	-74,655	-67,522	-60,78	-53,925	-46,288	-40,313	-1,024
32,5	-74,765	-67,488	-60,701	-53,873	-45,944	-40,399	-1,246
32,5	-74,659	-67,468	-60,598	-53,875	-46,297	-40,424	-0,864
32,5	-74,57	-67,518	-60,69	-53,965	-46,232	-40,473	0,195
32,5	-74,632	-67,458	-60,662	-53,934	-46,209	-40,402	-1,771
32,5	-74,708	-67,48	-60,675	-53,885	-46,413	-40,449	2,016
32,5	-74,717	-67,375	-60,72	-53,891	-46,392	-40,351	-2,365
32,5	-74,832	-67,488	-60,736		-46,4	-40,371	-2,416
Mid	-74,6864	-67,4915	-60,6521	-53,910111	-46,2664	-40,4522	-0,9723
Var	0,07372652	0,05480318	0,15333728	0,03902385	0,13817799	0,24311534	1,29512625
Delta	-20,776289	-13,581389	-6,7419889	0	7,64371111	13,4579111	23,156

	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz	fr in MHz
Ref	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34
fw in MHz	Phasenwerte in °						
40	74,672	76,115	77,889	79,356	81,169	82,25	104,272
40	74,682	76,059	77,839	79,372	81,154	82,246	104,301
40	74,678	76,103	77,866	79,322	81,204	82,233	104,271
40	74,651	76,081	77,885	79,363	81,119	82,221	104,316
40	74,576	76,118	77,911	79,313	81,251	82,242	104,156
40	74,581	76,073	77,898	79,321	81,18	82,205	104,14
40	74,579	76,052	77,909	79,304	81,144	82,29	104,197
40	74,592	76,106	77,911	79,321	81,126	82,338	104,216
40	74,619	76,125	77,93	79,358	81,156	82,34	104,228
40	74,559	76,099	77,906	79,406	81,155	82,342	104,17
Mid	74,6189	76,0931	77,8944	79,3436	81,1658	82,2707	104,2267
Var	0,04773177	0,02542724	0,02618821	0,03237008	0,03877514	0,05255484	0,06167847
Delta	-4,7247	-3,2505	-1,4492	0	1,8222	2,9271	12,7446

- Legende:* *fr* - Resonanzfrequenz der Antenne
fw - Arbeitsfrequenz (Frequenz die für die Messung verwendet wurde)
Mid - Mittelwert
Var - Wurzel der Varianz
 Δ - Differenz des jeweiligen Mittelwerts zum Mittelwert bei $fr = 32,5$ MHz