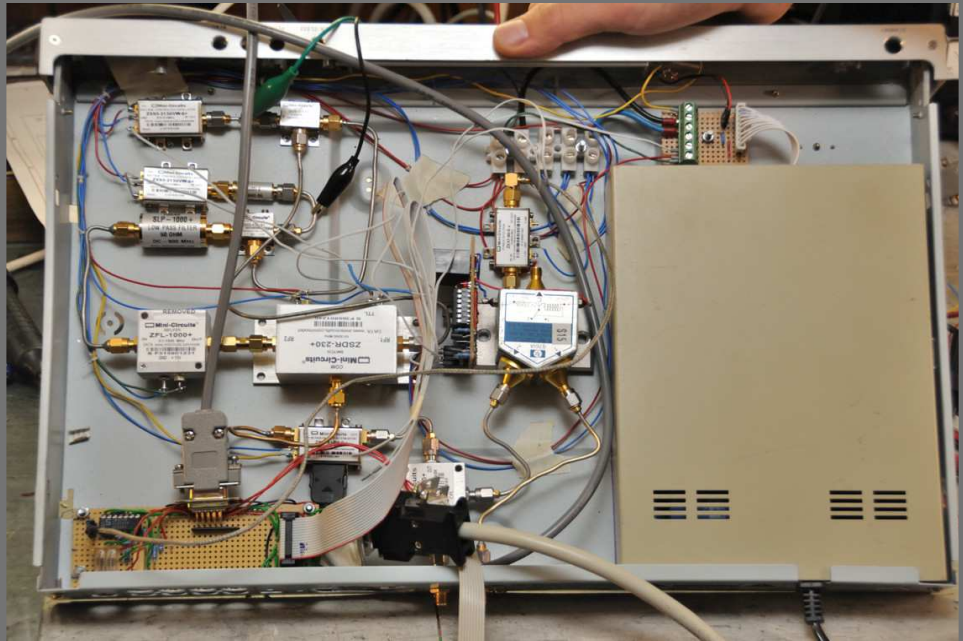
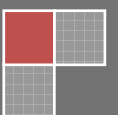


2014

Selbstgebauter skalarer Netzwerkanalysator



Simon Haase(16) und Tim Rambousky(15)
Christian-Gymnasium Hermannsburg
Betreuer: STD Thomas Biedermann



Inhalt

1.	Einleitung	2
2.	Problemstellung.....	2
3.	Grundlagen und Allgemeines	2
3.1.	Die Einheit Dezibel	2
3.2.	Signalleitungen	3
3.3.	Signalcharakteristik	3
3.4.	Eigenrauschen.....	3
3.5.	Peaks.....	3
4.	Der Netzwerkanalysator	4
4.1.	Komponenten	4
4.1.1.	HF-Schalter	4
4.1.2.	Mischer	4
4.1.3.	Koppler	5
4.1.4.	Spannungsgesteuerter Oszillator.....	5
4.1.5.	Powermeter	6
4.1.6.	Filter.....	6
4.2.	Funktionsweise des NWA	7
5.	Software	8
5.1.	Funktion des Programms	8
5.1.1.	Ansteuern der Hardware	8
5.1.2.	Frequenzen setzen.....	8
5.1.3.	Aufnehmen von Messreihen	8
5.1.4.	Speichern der Messdaten	8
5.1.5.	Automatische Berechnung des Frequenzverhaltens.....	9
5.1.6.	Manuelles Steuern des Interfaces.....	9
5.1.7.	Anzeigen bereits gespeicherter Messungen	9
6.	Messungen.....	9
6.1.	Kalibration.....	9
6.2.	Messparameter.....	9
6.2.1.	Frequenz	9
6.2.2.	Leistung	9
6.2.3.	S-Parameter.....	9
6.3.	Messobjekte	9
6.3.1.	Filter.....	9
6.3.2.	Dämpfungsglieder.....	10
6.3.3.	Dipol-Antennen	10
7.	Probleme in der Praxis	10
8.	Fazit.....	11
9.	Ausblick	11
10.	Literatur.....	12
11.	Quellen.....	12
12.	Danksagung.....	12

1. Einleitung

Die Radioastronomie-AG an unserer Schule hat sich zum Ziel gesetzt ein Radioteleskop aufzubauen. Wir haben schon innerhalb der letzten beiden Jahre einen Prototyp mit einem Spiegel, der einen Durchmesser von 1,8 Metern hat, fertiggestellt. Unser nächstes Ziel wird es sein, ein Radioteleskop mit einem Spiegel von 4 Metern Durchmesser zu bauen. Messen wollen wir damit dann die Strahlung von Objekten außerhalb unseres Sonnensystems.

2. Problemstellung

Zu unserem Radioteleskop gehört auch eine Empfangsanlage. Sie besteht aus Hochfrequenzkomponenten, deren Verhalten (Eigenschaften) sich stark von üblichen elektronischen Bauteilen und Schaltungen unterscheiden, da man es hier mit hochfrequenten Signalen zu tun hat. Folglich müssen wir ihr Verhalten frequenzabhängig untersuchen. Dafür gibt es Netzwerkanalysatoren. Das Ziel unseres Projektes ist es, einen skalaren Netzwerkanalysator zu bauen und mit diesem Messungen vorzunehmen.

3. Grundlagen und Allgemeines

Die Hochfrequenztechnik, kurz HF-Technik, ist ein Teilgebiet der Elektrotechnik, welches sich mit hochfrequenten Signalen beschäftigt. Von hochfrequenten Signalen kann ab einer Frequenz von 3MHz gesprochen werden. Man kann Signale mithilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeit, welche im Vakuum immer die Lichtgeschwindigkeit (c) ist und der Wellenlänge (λ) charakterisieren. Daraus ergibt sich die Frequenz (f), die in Herz (Hz) angegeben wird. Es gilt:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Die folgenden Abschnitte sollen einige weitere Grundlagen der HF-Technik erläutern.

3.1. Die Einheit Dezibel

Während in der niederfrequenten Elektronik fast ausschließlich nur lineare Einheiten verwendet werden, gibt es in der HF-Technik ein logarithmisches Maß, welches es erleichtert Größen, die sich um mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden zu vergleichen und damit zu rechnen. Das Dezibel (dB) beschreibt Leistungsverhältnisse über den dekadischen Logarithmus und ist über folgende Gleichung definiert:

$$[db] = 10 * \lg \frac{P_1}{P_2}$$

P_1 und P_2 sind hier die beiden Vergleichsgrößen. Hier ein Beispiel für ein Verhältnis von 1000:

$$\left(10 * \lg \frac{30.000}{30}\right) dB = (10 * \log 1000) dB = (10 * 3) dB = 30 dB$$

Vertauscht man die Größen für P_1 und P_2 erhält man ein Verhältnis von 0,001 bzw. -30 dB. Die Einheit kann nicht nur Verhältnisse angeben, sondern auch sogenannte Pegelwerte. Hat ein Signal eine Leistung von 1mW besitzt es einen Leistungspegel von 0dBm, bezogen auf die Leistung.

$$\left(10 * \lg \frac{1mW}{1mW}\right) dBm = (10 * \lg 1) dBm = (10 * 0) dBm = 0 dBm$$

Durch die Angabe beider Größen im logarithmischen Maß lässt sich der Einfluss einer Dämpfung oder einer Verstärkung durch Subtraktion oder Addition leicht beschreiben. Wenn man ein Ausgangssignal mit einer Leistung von 6dBm um 20dB verstärkt, hat das neue Signal einen Leistungspegel von 26dBm.

3.2. Signalleitungen

In der Hochfrequenztechnik werden zur Übertragung von Signalen spezielle Kabel benutzt. Die verwendeten Semi-Rigid-Leitungen (Abb.1) sowie die Koaxialkabel haben einen Innenleiter, der das Signal leitet und einen Außenleiter, der mit der Masse verbunden ist. Dadurch wird der Innenleiter abgeschirmt und elektromagnetische Energie kann nicht vom Leiter abgestrahlt werden. Außerdem muss in dieser Technik auch auf die Leitungslänge geachtet werden. Typische Koaxialkabel haben zum Beispiel eine Dämpfung von ca. 0,5 dB pro Meter. Ein Kabel mit einer Länge von 40 Metern hat also eine Dämpfung von 20 dB, was bedeutet, dass das Signal in der Leistung um den Faktor 100 abnimmt. Außerdem ist es wichtig, die Leitungen möglichst verlustfrei zu verbinden. Die in unserem Aufbau verwendeten SMA-Stecker garantieren durch eine Verschraubung, die die beiden Kabel zusammenpresst, guten Kontakt. Noch hinzufügen lässt sich, dass die Leitungen und auch die Bauelemente alle einen einheitlichen Leitungswellenwiderstand haben, der in unserem Aufbau 50 Ω beträgt. Dieser ergibt sich aus der Geometrie des Leiters und der verwendeten Materialien.



Abb. 1: Semi-Rigid-Leitungen und Bandpassfilter mit SMA-Stecker und Buchse

Wenn Komponenten mit verschiedenen Wellenwiderständen in einer Schaltung eingebaut sind, werden die Signale an den Übergängen nicht komplett aufgenommen, sondern reflektiert, sodass das Messergebnis verfälscht wird. Zur optimalen Energieübertragung müssen deshalb alle Komponenten den gleichen Wellenwiderstand aufweisen.

3.3. Signalcharakteristik

Üblicherweise werden mit einem Oszilloskop Signalverläufe in ihrer zeitlichen Entwicklung dargestellt ($U = U(t)$). Bei der Messung von hochfrequenten Signalen wird in der HF-Technik oft auf diese zeitbasierte Messung von Signalen verzichtet, bei der auf der Abszisse die Zeit und auf der Ordinate die Amplitude aufgetragen wird. Sie ermöglicht aber die Kontrolle des Signalverlaufes (z.B. Sinuskurven). In der HF-Technik wird dagegen vorzugsweise die Signalamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Das heißt, dass hier auf der Abszisse statt der Zeit die Frequenz und auf der Ordinate die Signalamplitude aufgetragen wird ($U = U(f)$). Um solche Messungen vorzunehmen, werden spezielle Messgeräte benötigt. Uns steht ein Spektrumanalysator der Firma Aaronia zur Verfügung, der über einen PC das Amplitudenspektrum eines Signals bestimmen kann. Dieser misst die Leistung des Signals bei Frequenzen von 10 MHz bis zu 9,4 GHz. Außerdem steht uns ein Breitbandoszilloskop (Bandbreite: 1,5 GHz) als Leihgabe zur Verfügung, das über das zeitbasierte Signal durch eine Fouriertransformation (FFT), also mathematisch, ein Abbild des Spektrums nahezu in Echtzeit liefert.

3.4. Eigenrauschen

Durch Unregelmäßigkeiten der Elektronenbewegung produziert jedes Bauelement ein Eigenrauschen. Es ist im Normalfall sehr schwach, kann sich aber bei ebenfalls schwachen Signalen als störend auswirken. Vor allem bei der Verstärkung sollte man vorsichtig sein, da das Rauschen genau wie das Signal verstärkt wird und somit das weitere System stört.

3.5. Peaks

Beim frequenzabhängigen Messen von schmalbandigen HF-Signalen betrachten wir meistens Peaks. Peaks sind scharfe Maxima, die sich meist durch eine sehr schmale Gaußsche Glockenkurve darstellen lassen. Sie werden gewöhnlich über folgende drei Eigenschaften definiert: Die Frequenz des Maximalwertes des Peaks, die Breite des Peaks auf halber Höhe und die Peakamplitude.

4. Der Netzwerkanalysator

Netzwerkanalysatoren (NWA) werden in der HF-Technik benutzt, um Bauteile und Schaltungen zu vermessen und somit zu charakterisieren. Das Messprinzip eines NWA ist es, ein hochfrequentes HF-Signal einer bestimmten Frequenz in das zu testende Objekt (eng: DeviceUnderTest, kurz: DUT) einzuspeisen und die reflektierte und transmittierte Leistung zu messen (Abb. 2). Die Verhältnisse der Leistung dieser Signale zur Leistung des eingespeisten Signals nennt man Streuparameter.

Es gibt den S_{11} Parameter, welcher das Verhältnis der Leistung des reflektierten Signals zur Leistung des eingespeisten Signals zeigt. Der S_{21} Parameter beschreibt das Verhältnis von transmittierter Leistung zur eingespeisten Leistung des Signals. Man unterscheidet zwischen skalaren und den vektoriellen NWA. Die vektorielle Ausführung kann zusätzlich zu der Leistung der Streuparameter auch die Phasenverschiebung des Signals bestimmen. Da vektorielle NWAs für die von uns benötigte Bandbreite mehrere 10.000 € kosten und für eine JuFo-AG daher nicht in Frage kommen, haben wir uns für den Bau eines einfacheren skalaren NWA entschieden.

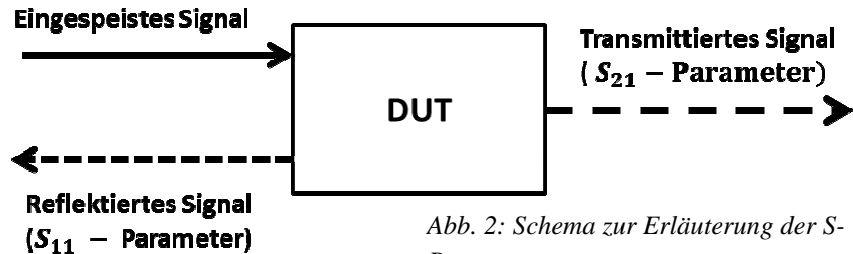


Abb. 2: Schema zur Erläuterung der S-Parameter

4.1. Komponenten

Unsere HF-Hardware besteht zum Großteil aus Komponenten der Firma MiniCircuits. Im folgenden Abschnitt sollen die Funktionen der verschiedenen verwendeten Bauteile und anschließend das Funktionsprinzip unseres NWAs erläutert werden.

4.1.1. HF-Schalter

Im Gegensatz zur niederfrequenten Elektronik können in der HF-Technik keine einfachen Schalter benutzt werden. Wir arbeiten daher mit speziellen HF-Schaltern, die mechanisch (HF-Relais) oder elektronisch (Dioden-Schalter) aufgebaut sein können. HF-Schalter müssen an ihren offenen Ausgängen stets mit 50 Ω abgeschlossen sein.

HF-Relais

HF-Relais sind mechanische Umschalter. Das von uns verwendete selbsthaltende Relais wird durch einen Stromimpuls umgeschaltet. Eine vorgeschaltete Elektronik ermöglicht die Ansteuerung über zwei Anschlüsse, sodass dort die Position durch das Anlegen von 5V an einen der beiden Eingänge die Position vorgibt.

Pin-Diodenschalter

Pin-Dioden sind Dioden, die besonders für die HF-Technik geeignet sind, da sie eine sehr geringe Eigeninduktivität und Eigenkapazität haben. Durch das Anlegen einer Gleichspannung ist es möglich, die Dioden, die in die Signalleitung eingebaut sind, auf Durchlass zu schalten. Dann können sowohl die Gleichspannung als auch die Wechselfspannung hindurch geleitet werden. Kondensatoren an den Ausgängen verhindern, dass Gleichspannungen auf der Signalleitung das Schaltverhalten stören.

4.1.2. Mischer

Der ideale Mischer ist in der Lage, aus zwei Signalen die Differenz und die Summe zu bilden (Abb.3). Die Eingangssignale werden in unserem Fall durch die beiden VCOs erzeugt. Das eine Eingangssignal wird mit LO (Lokaloszillatorsignal) bezeichnet, während

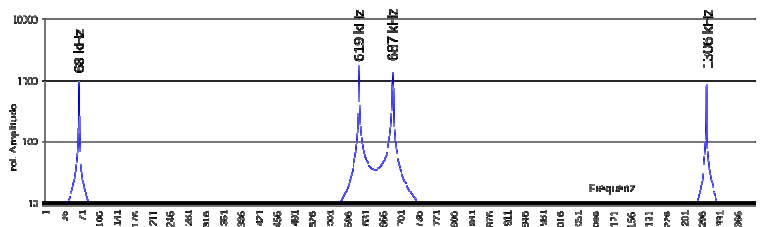


Abb. 3: Der ideale Mischer [Mur2, 09]

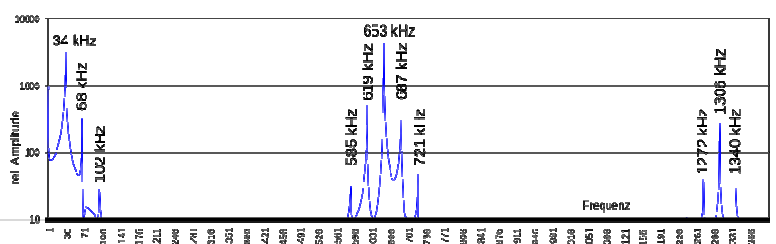


Abb. 4: Der reale Mischer [Mur1, 09]

das andere mit HF (oder englisch RF) bezeichnet wird. Zusätzlich zur Summen- und Differenzfrequenz entstehen am Ausgang, welcher mit IF (eng. intermediate frequency) gekennzeichnet ist, aber noch weitere Mischfrequenzen, da sich z.B. die Differenz auch zu sich selbst addieren kann oder mit einem Eingangssignal die Differenz oder Summe bildet (Abb.4). Dies führt zu weiteren Peaks mit etwas schwächerer Leistung. Um möglichst viele unerwünschte Frequenzen aus dem Signal zu entfernen, sind Filter nötig. Insbesondere müssen, wenn unerwünscht, die Eingangssignale herausgefiltert werden, da diese die höchste Leistung haben. Der Mischer ist allerdings für unseren Aufbau unverzichtbar, da ein so weites Frequenzspektrum nicht von einem einzigen VCO abgedeckt werden kann.

4.1.3. Koppler

Ein Koppler ist in der Hochfrequenztechnik nötig, da die Signale nicht einfach wie in der Niederfrequenztechnik durch das Verbinden von Kabeln aufgeteilt werden können. Ein Koppler hat die Funktion, aus einem Signal einen Teil auszukoppeln und dieses für andere Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Dies wird beispielsweise benötigt, wenn mit verschiedenen Messgeräten gleichzeitig ein Signal analysiert werden soll.

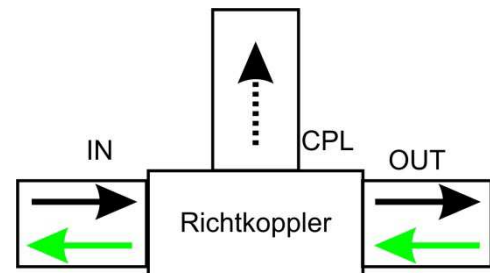


Abb. 5: Richtkoppler

Richtkoppler sind spezielle Koppler, die die Eigenschaft haben, Signale nur in bestimmter Richtung auszukoppeln (Abb.5). Dies ist wichtig, wenn die Reflektion an einem Bauteil gemessen werden soll.

4.1.4. Spannungsgesteuerter Oszillator

Spannungsgesteuerte Oszillatoren (kurz: VCO) erzeugen Sinusschwingungen. Durch das Verändern der Steuerspannung kann die Frequenz des Ausgangssignals gesteuert werden. Die von uns verwendeten VCOs vom Typ „ZX95-2150VW“ (Abb.6) der Firma „Mini-Circuits“ haben einen Frequenzbereich von 850 bis 2150 MHz. Der Vorteil dieser vorgefertigten Komponente ist, dass sie in einem HF-dichten Gehäuse eingebaut ist, sodass Störstrahlung nach außen verhindert wird.

Funktionsprinzip

Das Parallelschalten von einer Spule und einem Kondensator erstellt einen Schwingkreis. Durch eine Anfangsaufladung des Kondensators liegt eine Spannung an diesem an. Er entlädt sich über die Spule, wobei in dieser ein magnetisches Feld entsteht. Im Moment, in dem der Kondensator vollständig entladen ist, ist dieses am größten. Durch den Abbau des Feldes entsteht eine Induktionsspannung an der Spule, die den Kondensator wieder auflädt. Wenn dieser Vorgang sich wiederholt, entsteht eine Schwingung. Um den Verlust von Leistung in den Kabeln und Bauteilen auszugleichen, wird ein Teil der Spannung ausgekoppelt und verstärkt wieder in den Schwingkreis zurückgeführt. Damit es möglich ist, die Frequenz zu steuern, wird der Kondensator durch eine Kapazitätsdiode ersetzt, welche durch das Anlegen einer Gleichspannung ihre Kapazität und damit die Frequenz ändern kann.



Abb. 6: VCO der Firma „Mini-Circuits“

Kenndaten

Ein VCO hat neben seiner Ausgangsfrequenz weitere Kenndaten.

Steuerspannung

Der in unserem Gerät eingebaute VCO benötigt eine Steuerspannung von 0 bis 25 V. Dabei besteht eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen der Steuerspannung und der ausgegebenen Frequenz. Um aus der ausgegebenen Frequenz die dafür benötigte Steuerspannung zu errechnen, haben wir ein Polynom ermittelt, welches die Umrechnung ermöglicht. Dieses wurde mit Hilfe von Werten aus dem Datenblatt bestimmt. Eine Änderung der Steuerspannung um 0,1 V führt zu einer Veränderung von 4 bis 6 MHz in der Ausgangsfrequenz.

Ausgangsleistung

Die Leistung der VCOs ist in unserem Frequenzbereich nicht konstant. Daher muss die Ausgangsleistung durch eine Kalibration ausgeglichen werden, um unsere Messungen vergleichen zu können. Im Mittel beträgt die Ausgangsleistung +4 dBm, kann aber laut Datenblatt je nach Ausgangsfrequenz um 1,5 dBm schwanken.

Das Ausgangssignal

Im Idealfall besteht das Ausgangssignal nur aus der Grundschwingung. In der Realität kommen aber auch noch die sogenannten Harmonischen hinzu, wie z.B. die erste Oberschwingung bei der doppelten Frequenz. Die gesamte Leistung der Harmonischen ist im Datenblatt mit 22 dBc angegeben. Das bedeutet, dass dessen Leistung 22 dB tiefer ist als die des gewünschten Signals. Es sind auch nicht-harmonische zusätzliche Schwingungen vorhanden, die aber aufgrund ihrer sehr geringen Leistung auf unsere Messungen keinen Einfluss haben.

4.1.5. Powermeter

Das Powermeter ist ein Leistungsmessgerät. Es kann die Leistung hochfrequenter Signale bestimmen und gibt leistungsabhängig eine Spannung aus. Das von uns verwendete Powermeter vom Typ „ZX47-60+“ kann Leistungen im Bereich von -60 bis +5 dBm messen.

Funktionsweise

Um die Leistung eines HF-Signals zu bestimmen, werden die Größen Strom und Spannung benötigt. Da es schwierig ist den Strom zu messen, wird meist nur die Spannung an einem Abschlusswiderstand gemessen und dann in die Leistung in dB umgerechnet. In dem verwendeten Powermeter geschieht dies an der Referenzimpedanz von 50 Ω , was es mit den anderen Komponenten kompatibel macht. Der nichtlineare Spannungswert kann mithilfe der Kennlinie aus dem Datenblatt in eine Leistung umgerechnet werden.

4.1.6. Filter

In der HF-Technik haben Filter (Abb.7) eine wichtige Bedeutung. Sie sind so aufgebaut, dass sie Wechselspannung nur in bestimmten Frequenzen passieren lassen. Für uns sind drei verschiedene Typen von Filtern relevant. Diese unterscheiden sich durch die Frequenzbereiche, in denen sie durchlässig sind bzw. sperren. Der Hochpassfilter ist so konstruiert, dass es tiefe Frequenzen aus dem Signal herausfiltert. Der Gegensatz dazu ist der Tiefpassfilter. Dieses lässt tiefe Frequenzen passieren und filtert die hohen Frequenzen heraus. Um den Effekt zu verstärken, können mehrere Filter hintereinander geschaltet werden. Wenn man nun Hoch- und Tiefpassfilter in Reihe schaltet, erhält man einen Bandpassfilter. Dieser hat die Eigenschaft, nur in dem Bereich zwischen zwei Frequenzen durchlässig zu sein. Filter werden benötigt, um aus einem Gemisch an Signalen verschiedener Frequenzen das gewünschte Signal in einem definierten Frequenzbereich zu selektieren.



Abb. 7: Bandpassfilter der Firma „Minicircuits“

Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip ist bei Hoch- und Tiefpassfiltern ist ähnlich. Es werden die Eigenschaften von Spulen und Kondensatoren ausgenutzt. Eine Spule lässt im Gegensatz zum Kondensator niederfrequente Signale passieren, sperrt aber hochfrequente Anteile. Wird neben einem Widerstand ein Kondensator so in die Schaltung eingebaut, dass er die Signalleitung mit der Masse verbindet, entsteht ein Tiefpassfilter. Der Kondensator ist für geringe Frequenzen undurchlässig, sodass

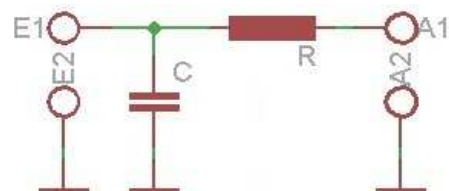


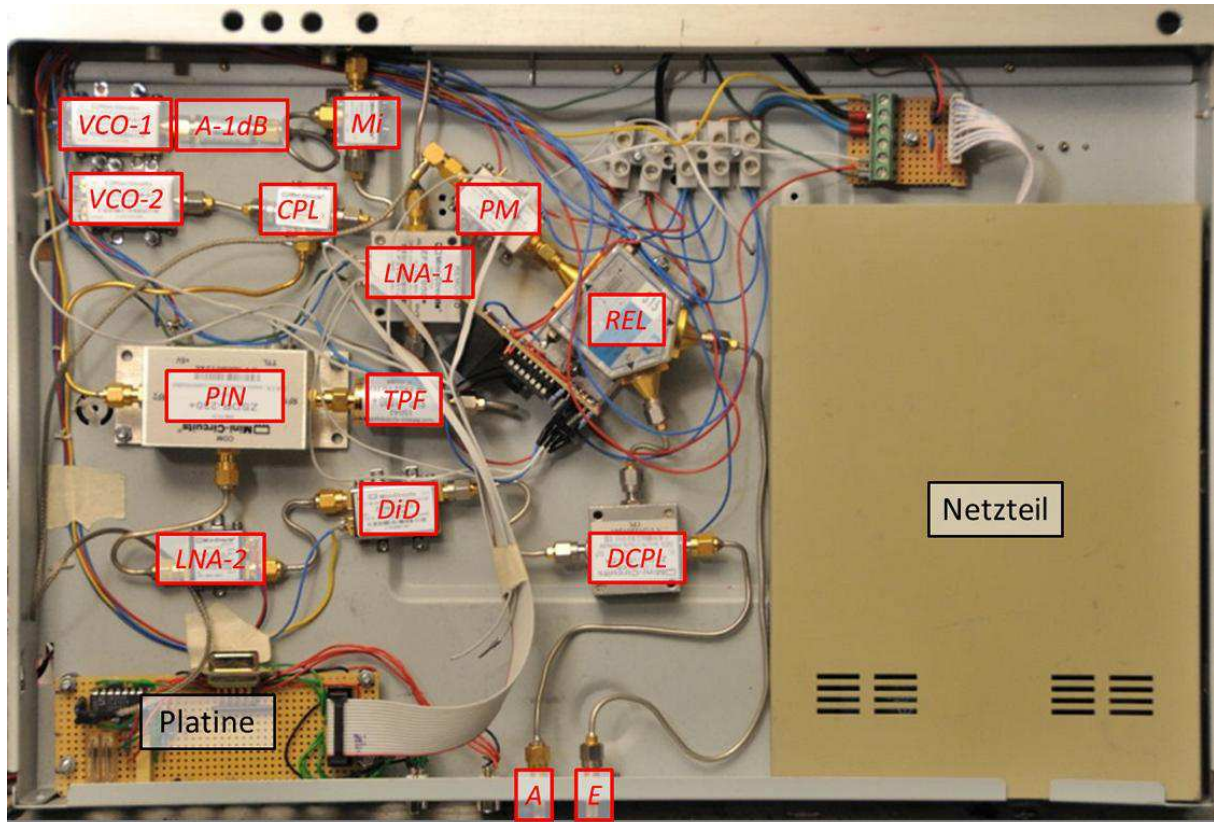
Abb. 8: Schaltplan eines Tiefpassfilters

diese nahezu unverändert vom Eingang E zum Ausgang A fließen können. Da der Kondensator für hohe Frequenzen leitend wirkt, werden Signalanteile dieser Frequenzen auf Masse abgeleitet und so aus dem Signal entfernt (Abb.8). Nach dem gleichen Prinzip funktionieren Tiefpassfilter. Wenn man den Kondensator gegen eine Spule tauscht, kehrt sich das Verhalten um und man erhält ein Hochpassfilter.

4.2. Funktionsweise des NWA

(Schaltplan des Netzwerkanalysators siehe Anhang)

Unser Netzwerkanalysator arbeitet nach folgendem Prinzip: HF-Signale werden von zwei VCOs erzeugt. Für die Frequenzen von 200 bis 850 MHz wird der VCO-2 (Lokaloszillator) auf seine maximale Frequenz von etwa 2150 MHz gesetzt, während der andere von 1950 bis 1300 MHz durchfahren wird (siehe Abb. 9). 850 MHz ist in diesem Fall die Umschaltfrequenz und 2150 MHz die obere Mischfrequenz. Wir sind in der Lage, beide Frequenzen über unsere Software zu variieren.



Dann berechnet das Programm die benötigten anderen Frequenzen neu. An den Ausgang des VCO-1, den wir durchfahren, setzen wir noch einen 1 dB Abschwächer (A-1dB), der die reflektierten Signale abschwächt und somit die Auswirkungen auf den VCO reduziert. Diese beiden Signale werden in einen Mischer (Mi) geleitet. Hier nutzen wir die Differenzfrequenz. Allerdings müssen die Differenzfrequenzen wegen eines nicht erwarteten Leistungsabfalls an dieser Stelle noch verstärkt werden (LNA-1). Um die Originalsignale der VCOs aus dem Ausgangssignal des Mixers zu filtern, ist ein Tiefpassfilter (TPF) eingebaut, der alle Frequenzen über 1 GHz so stark abschwächt, dass sie in unserer Messung im Eigenrauschen untergehen. Damit können wir Frequenzen von 200 bis 850 MHz einstellen.

Abb. 9: Bild zur Erläuterung des NWA

Für Frequenzen von 850 bis 2150 MHz nehmen wir das Signal direkt von VCO-1. Um dieses Signal zu erhalten, ist dieser VCO an einen Koppler (CPL) angeschlossen. Dieser stellt das Signal abgeschwächt für den zweiten Signalweg zur Verfügung.

Um jetzt zwischen den entsprechenden Ausgängen und den beiden Frequenzbereichen (200-850 MHz bzw. 850-2050 MHz) wählen zu können, werden sie an einen Pin-Diodenschalter (PIN) angeschlossen. Dieser kann ebenfalls über unsere Software angesteuert werden und somit beim Durchfahren der Umschaltfrequenz von 850 MHz auf das zweite ausgekoppelte Signal des VCO-1 umgeschaltet werden. Um unsere Signalleistung so groß wie möglich zu machen, damit wir auch sehr große Dämpfungen messen können, verstärken wir das Signal beider Ausgänge um 20 dB (LNA-2). Da die Leistung aus den beiden Ausgängen nicht konstant ist, bauen wir ein digitales Dämpfungsglied (DiD) hinter den Schalter, mit dem wir über die Software eine bestimmte Dämpfung einstellen können.

Für die eigentliche Messung des DUT wird das Signal durch einen Richtkoppler (DCPL) geleitet und gelangt an den Ausgang (A) des NWAs. Hier kann man jetzt den DUT anschließen. Nun muss man wählen, ob man den S_{11} oder den S_{21} Parameter messen möchte. Beim S_{21} Parameter wird das HF-Relais (REL) auf den Eingang (E) des NWAs geschaltet und das Signal wird weiter zum Powermeter (PM) geleitet. Beim S_{11} -Parameter wird das vom DUT reflektierte Signal gemessen. Der Richtkoppler (DCPL) ist nun dafür verantwortlich, das reflektierte Signal auszukoppeln und über das HF-Relais (REL) in das Powermeter (PM) zu leiten

5. Software

Die von uns entwickelte Software ist ein zentraler Bestandteil unseres Projektes. Sie ist in der objektorientierten Programmiersprache C# entwickelt worden.

5.1. Funktion des Programms

Für Bilder zur Programmoberfläche siehe Anhang

5.1.1. Ansteuern der Hardware

Zur Steuerung der HF-Komponenten wird eine Schnittstelle benötigt. Anders als in unserem Vorprojekt verwenden wir dafür keinen Mikrokontroller, sondern ein USB-Interface des Typs K8055 der Firma Velleman. Dieses verfügt über einen Treiber, der die Einbindung in C# ermöglicht. Das Interface hat analoge sowie digitale Ein- und Ausgänge (Ports). Die digitalen Ports können einen Wert von 0 oder 1 annehmen, die analogen eine Spannung von 0 bis 5V mit einer Auflösung von 8 Bit verarbeiten. Wir verwenden die digitalen Ausgänge, um die HF-Schalter und den digitalen Abschwächer zu schalten. An den analogen Ausgängen sind über Spannungsverstärker die VCOs angeschlossen, sodass ihre Frequenz gesteuert werden kann. Eine Veränderung des Ausgangs um ein Bit verursacht eine Frequenzänderung um 4 bis 6 MHz. Am analogen Eingang ist das Powermeter angeschlossen, mit dem die Leistung des Signals eingelesen werden kann.

5.1.2. Frequenzen setzen

Um die Messung zu starten (Start-Button-Click-Ereignis), wird ein Timer aktiviert. Wenn dieser die vorgegebene Zeit erreicht hat, wird das zugehörige Timer-Ereignis ausgeführt. Darin erfolgt das Setzen der Ausgangsfrequenz (fOut). Hierbei wird abgefragt, ob die Frequenzen der VCOs gemischt werden müssen. Entsprechend wird der Pin-Diodenschalter (ZSDR 230) in die benötigte Position gebracht und die Frequenz gesetzt (Abb.10). Die Messung wird in der Registerkarte VCO-Steuerung angezeigt und kann so verfolgt werden. In der Parametereinstellung können alle für die Messung relevanten Parameter eingestellt werden.

5.1.3. Aufnehmen von Messreihen

Das Programm ist in der Lage, Messreihen aufzunehmen und schon vor der Abspeicherung anzuzeigen. Das erleichtert das Interpretieren und Auswerten einer Messung erheblich, da schon im vornhinein Aussagen über die Verlässlichkeit einer Messung gemacht werden können. Beispielsweise könnte ein Kabel nicht richtig angeschlossen sein und muss evtl. nachgezogen werden. Außerdem bietet sich somit die Möglichkeit, eine Echtzeit-Messung durchzuführen.

5.1.4. Speichern der Messdaten

Die Messreihen können in Excel-Tabellen gespeichert werden, somit können jederzeit Messungen verschiedener Bauteile verglichen oder auch auf einen anderen Computer übertragen werden, der sie dann mithilfe der Software öffnen kann. So kann man aus verschiedenen Bauteilen das optimal geeignete ermitteln.

Start-Button-Click-Ereignis:

Parameter abfragen und speichern
Timer starten

Timer-Ereignis:

Gemischte Frequenz?	
Ja	Nein
ZSDR 230 auf 1	ZSDR 230 auf 2
VCO 1 auf fMisch	VCO 1 auf fOut
VCO 2 auf fOut-fMisch	
Messwert aufnehmen und speichern	
fOut = fStopp?	
Ja	Nein
Timer anhalten	fOut += fStep

Abb. 10: Struktogramm Frequenz setzen

5.1.5. Automatische Berechnung des Frequenzverhaltens

Das Verhalten der Bauteile kann nur mit den Kenndaten aus den Datenblättern verglichen werden, wenn die gemessene Leistung in Relation zur Ausgangsleistung gesetzt wird und daraus dann die Dämpfung des Messobjektes berechnet wird. Dies geschieht in unserem Programm durch eine Kalibration automatisch. Hierzu muss von der kalibrierten Leistung die gemessene Leistung abgezogen werden.

5.1.6. Manuelles Steuern des Interfaces

Über die manuelle Steuerung des Interfaces können alle Ports manuell angesteuert oder ausgelesen werden. Wenn beispielsweise das Relais oder die VCOs außerhalb einer Messung angesteuert werden sollen, ist dies dort möglich. So kann man mit den VCOs eine einzelne Frequenz anfahren oder durch Schalten des HF-Relais die Messart ändern.

5.1.7. Anzeigen bereits gespeicherter Messungen

Um abgespeicherte Messungen wieder anzeigen und vergleichen zu können, haben wir in unsere Software einen Viewer integriert. Dieser ermöglicht den Vergleich von Messreihen. Außerdem können die Messparameter, die mit der Messung abgespeichert wurden, eingesehen werden.

6. Messungen

6.1. Kalibration

Die Leistung am Ausgang unseres Netzwerkanalysators ist nicht konstant. Dies beeinflusst die Messung, daher müssen wir eine Kalibrationsmessung durchführen. Bei dieser wird der Aus- und Eingang unseres NWA mit einem HF-Kabel verbunden und dann eine Messung gestartet. Die so aufgenommene Kalibrationskurve wird von der DUT-Messung dann abgezogen.

6.2. Messparameter

Die Messparameter spielen für unsere Messergebnisse eine entscheidende Rolle. Wenn beispielsweise Messungen verglichen werden sollen, müssen deren Parameter übereinstimmen.

6.2.1. Frequenz

Der zu messende Frequenzbereich ist bei den Parametern als erstes zu nennen, denn die Start- und die Stoppfrequenz beschränken den Messbereich, in dem eine Messung vorgenommen wird. Die eingestellte Misch- und Schaltfrequenz sind Größen, die auf die Nebenpeaks und so auf die Gesamtleistung, die gemessen wird, einen wesentlichen Einfluss haben. Dieser kann zwar durch die Kalibration verringert werden, ist aber nicht komplett zu unterdrücken.

6.2.2. Leistung

Die zu messende Größe ist die Leistung. Um die Eigenschaften der DUTs in dieser Hinsicht vergleichen zu können, kann die ausgegebene Leistung mithilfe einer Kalibration kalibriert werden.

6.2.3. S-Parameter

Die S-Parameter geben den Weg der gemessenen Signale im DUT an. S_{11} bedeutet, dass die Reflektion am Eingang des Bauteils gemessen wird. Der S_{21} -Parameter beschreibt die hindurch gelassene Leistung.

6.3. Messobjekte

6.3.1. Filter

In Abbildung 11 ist die Messung eines Bandpassfilters mit unserem Messgerät (blau) abgebildet. Zum Vergleich sind die Angaben aus dem Datenblatt (grün) ebenfalls eingezeichnet. Auf der Abszisse ist die Frequenz in MHz aufgetragen.

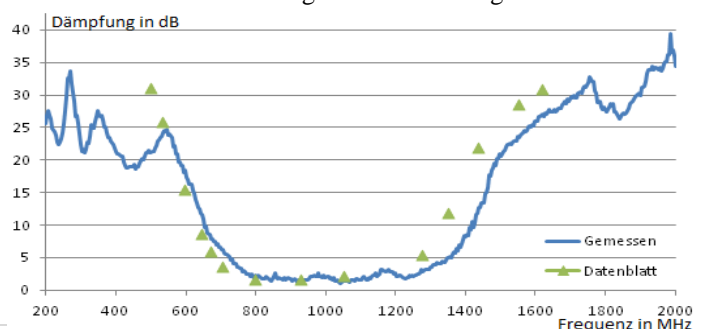


Abb.11: Messung eines Filters

Auf der Ordinate kann man die Dämpfung in dB ablesen. Unsere Messung stimmt mit den Angaben aus dem Datenblatt – zumindest für den Frequenzbereich 600 MHz bis 1600 MHz – gut überein. Die Verschiebung unserer Messkurve ab etwa 1200 MHz zu höheren Frequenzen liegt vermutlich an der Toleranz der Datenblattwerte.

6.3.2. Dämpfungsglieder

Dämpfungsglieder sind im Idealfall frequenzunabhängige Bauteile. Sie haben die Funktion, die Leistung des Signals im gesamten Frequenzbereich um einen bestimmten Wert zu verringern. In der Niederfrequenztechnik kann das durch einen Spannungsteiler geschehen. In der HF-Technik ist zusätzlich noch eine Impedanzanpassung, bei uns auf 50Ω , nötig. Dieses Dämpfungsglied hat eine Dämpfung von 10 dB, hier als die rote Linie dargestellt. Man erkennt, dass unser Dämpfungsglied nur maximal 1,5 dB von seinen Sollwerten abweicht (Abb. 12), was ziemlich gut ist (man beachte die eingeschränkte Skalierung der Ordinatenachse). Außerdem erkennt man, dass im Bereich von 200 bis 900 MHz eine geringfügig höhere Abschwächung vorliegt.

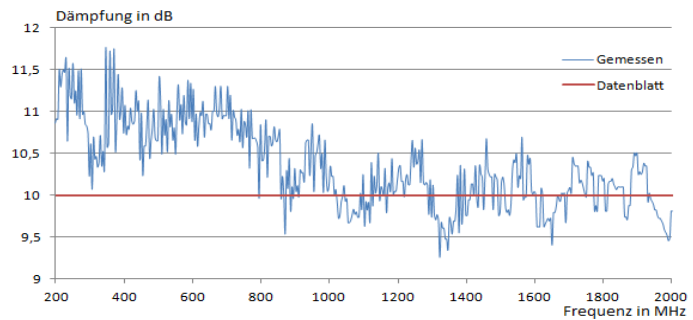


Abb. 12: Messung eines Dämpfungsgliedes

6.3.3. Dipol-Antennen

Dipol-Antennen können den elektrischen Strom und die Spannung eines Signals (z.B. aus einem VCO) in eine elektromagnetische Welle umwandeln. Sie haben nur einen Eingang und wir können daher auch nur den S_{11} Parameter bestimmen. Eine Dipol-Antenne ist üblicherweise für eine bestimmte Frequenz ausgelegt. Abbildung 13 zeigt die reflektierte Leistung in dB. Dabei gilt: Je geringer die Leistung, desto mehr Signal wurde abgestrahlt und desto besser ist der Dipol für diese Frequenz angepasst.

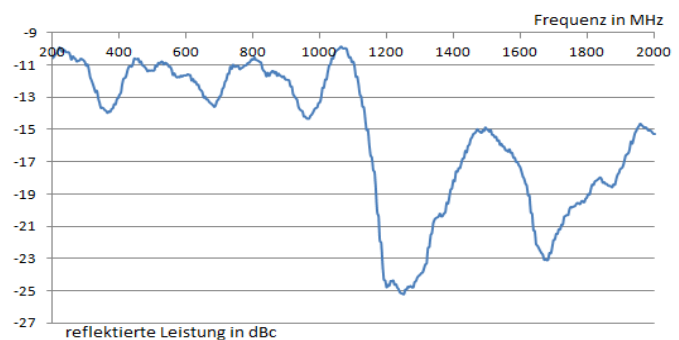


Abb. 13: Messung eines Dipols

Dieser Dipol soll seine optimale Sendefrequenz bei ca. 1200 MHz haben. Wie man erkennen kann, liegt die optimale Sendefrequenz tatsächlich bei 1200 MHz. Allerdings ist sein Abstrahlverhalten relativ breitbandig. Dies bedeutet, dass der Dipol Signale mit einer ähnlichen Frequenz, die für die Messung aber uninteressant sind, mit annähernd gleicher Leistung abstrahlt oder empfängt. Dies schränkt seine Verwendbarkeit ein, wenn es in der Nähe der zu messenden Frequenz Störsignale gibt und ist keine positive Eigenschaft des Dipols.

7. Probleme in der Praxis

Natürlich hat es einen Grund, dass Netzwerkanalysatoren erst ab 10.000 € zu erhalten sind und natürlich kann unser NWA nicht mit industriell gefertigten Geräten mithalten. Das hat vor allem einen Grund: Es ist problematisch, schmalbandige Signale ohne Nebenpeaks zu erzeugen. Vor allem in unserem Mischer entstehen viele Peaks bei unerwünschten Frequenzen. So wird das Reflexions- und Transmissionsverhalten unserer DUTs bei einer fest vorgegebenen Sollfrequenz durch die Nebenpeaks tatsächlich bei mehreren Frequenzen gleichzeitig gemessen, was somit das Ergebnis verfälscht. Dies ist deutlich an unserer Dipolmessung zu sehen. Unser Powermeter misst mit einer sehr großen Bandbreite, die Zuordnung von Leistung und Frequenz erfolgt in der Software. Wenn wir einen Nebenpeak des Hauptsignals bei der Sendefrequenz oder einer harmonischen Frequenz haben, wird bei diesen Frequenzen ebenfalls eine Leistung gemessen. Die Software ordnet diese Leistung aber der Frequenz zu, bei der sich der Hauptpeak befinden sollte. Somit lassen sich z.B. bei der Dipolmessung die Nebenpeaks bei 400 MHz, 900 MHz und 1700 MHz erklären.

8. Fazit

Als Projekt haben wir einen skalaren Netzwerkanalysator, ein Messgerät für HF-Anwendungen selbst gebaut. Unser NWA besteht aus einer Hard- und Softwarekomponente. Die Hardware setzt sich im Wesentlichen aus marktverfügbaren HF-Schaltungskomponenten und klassischen Elektronikbauteilen für die Schnittstelle zu einem PC zusammen. Die HF-Technik war für uns ein absolut neuer und durchaus komplizierter, aber auch spannender Themenbereich, in den wir im Laufe des Projektes hineinwachsen konnten. Dies war sehr anspruchsvoll, hat aber auch eine Menge Spaß bereitet. Wir haben versucht, den Hardware-Aufbau möglichst günstig zu gestalten. Beispielsweise nutzen wir das Gehäuse und das Netzteil eines alten DVD-Players zur Unterbringung der NWA-Komponenten. Um einen Frequenzbereich von 200 MHz bis 2050 MHz abdecken zu können, mussten wir mit zwei VCO-Bausteinen, diversen Kopplern und Mischern arbeiten. Unser NWA erzeugt Frequenzen unterhalb von 850 MHz durch Mischen der Frequenzen aus beiden VCOs und schaltet automatisch bei 850 MHz auf die Generierung der Frequenzen durch einen einzelnen VCO um. Um sowohl die reflektierte als auch die transmittierte Leistung messen zu können, musste beispielsweise ein Richtkoppler verwendet werden.

Ein wesentlicher Bestandteil unserer Arbeit war die Erstellung der Steuer-, Auswertungs- und Darstellungssoftware in C#. Unsere Software kann nicht nur unsere Hardware ansteuern, sondern hat noch viele zusätzliche Funktionen erhalten wie z.B. Messreihen zu speichern, zu vergleichen, sie in Excel-Tabellen abzulegen und die Ergebnisse grafisch anzuzeigen. Außerdem können wir jederzeit die Parameter für unsere Messungen neu setzen, wie z.B. die Start- und Stoppfrequenz der Messung, die Umschalt- oder die Mischfrequenz.

Mit dem aufgebauten NWA konnten bereits mehrere HF-Bauteile erfolgreich vermessen und damit die Funktionsfähigkeit unseres NWA demonstriert werden. Der Frequenzverlauf der Dämpfung eines Bandpassfilters konnte mit guter Übereinstimmung zu den Dämpfungswerten aus dem Datenblatt nachgemessen werden. Ebenso ergaben die Messungen an einem Dämpfungsglied und die Messung der Reflexionseigenschaften einer Dipolantenne sehr realistische Ergebnisse. Damit haben wir nachgewiesen, dass unser Konzept, der Aufbau und die Software unseres NWA funktionieren. Sicherlich können noch ein paar Aspekte optimiert werden: Beispielsweise liegt der momentan zur Verfügung stehende Messbereich bei 40 dB anstatt der erwarteten 60 dB. Hier muss die Signalstärke aus der Komponenten-Kette noch erhöht werden.

Unser NWA wird als Messgerät ein wichtiges Hilfsmittel im weiteren Fortgang unserer Radioastronomie-AG sein. Unser NWA wird immer dann benötigt werden, wenn Eigenschaften von Antennen oder anderen HF-Bauteilen charakterisiert werden müssen, bevor sie in das Gesamtsystem eingebaut werden. Besonders wichtig wird unser NWA, wenn die Dipolantenne unseres Radioteleskops im eingebauten Zustand optimiert werden muss.

9. Ausblick

Wir werden auf jeden Fall noch weiter an unserem Projekt arbeiten. In diesem Teil beschreiben wir, was wir alles noch zu verbessern hoffen:

- Wir wollen herausfinden, was unseren Leistungsverlust an unserem Mischer verursacht. Falls wir den Grund dazu herausfinden, würden wir den im vorherigen Abschnitt genannten Verstärker und das digitale Dämpfungsglied einsetzen können.
 - Eine Möglichkeit, um das oben angesprochene Problem der Nebenpeaks zu lösen, wäre das Einfügen eines digital ansteuerbaren schmalbandigen Bandpassfilters, der immer nur einen schmalen Bereich um unser Hauptsignal passieren lässt. Diese sind leider sehr kostspielig.
 - Interessant wäre auch eine zusätzliche Darstellung der Messergebnisse in der Software. Die Ergebnisse sollten auch als lineare S-Parameter (in Prozent statt logarithmisch) dargestellt werden können.
 - Wir haben uns speziell für unsere Radioastronomie-AG einen leistungsfähigen Server angeschafft. Diesen schnellen Computer möchten wir nutzen, um unsere NWA- Messungen in nahezu Echtzeit ablaufen lassen zu können.
-

Einzelne Punkte können wir wahrscheinlich schon bis zur Präsentation der Arbeit verwirklichen.

10.Literatur

Jugendforscht-Arbeiten aus unserer Arbeitsgemeinschaft

- Selbstgebauter Messsignaloszillator im Gigahertzbereich (Jugendforscht-Wettbewerb 2013,Fachbereich Technik, Lucas Jürgens, Simon Haase);
- Bau und Untersuchung von Dipol-Antennen um GHz-Bereich(Jugendforscht-Wettbewerb 2013,Fachbereich Technik, Tim Rambousky, Fabian Jablonski);
- HF-Empfangsanlage zur Aufbereitung von Signalen im GHz-Bereich (Jugendforscht-Wettbewerb 2013,Fachbereich Technik, Sophie Müller, Lukas Amann).

11.Quellen

Verwendete Software

- Microsoft Visual C# 2010 Express
- Eagle 6.2.0 Light (Erstellen der Schaltpläne)

Verwendete Datenblätter

Quelle: <http://www.minicircuits.com/>

- ZX95-2150VW (VCO)
- ZX47-60+ (Power-Meter)
- ZX30-17 (Koppler)
- ZFDC-10-5 (Koppler)
- ZX05-43MH+ (Mischer)
- SLP-1000+ (Tiefpassfilter)
- ZX60-P105LN (Verstärker)
- ZSDR-230 (Pin-Diodenschalter)
- ZX47-60 (Powermeter)

Bilder

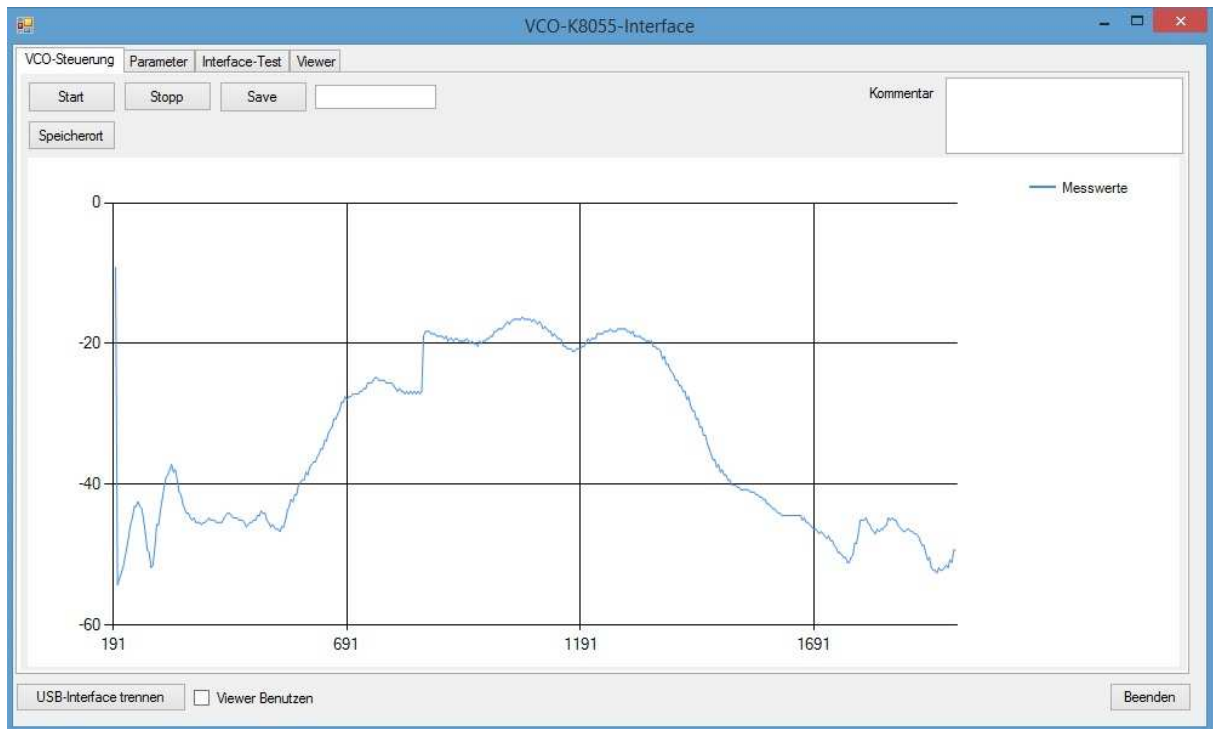
[Mur1,09] Murmann, F. (2009). *wikipedia.org*. Abgerufen am 05. 01 2014 von Mischer (Elektronik): http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Mischer_15.svg/2000px-Mischer_15.svg.png

[Mur2, 09] Murmann, F. (2009). *wikipedia.org*. Abgerufen am 05. 01 2014 von Mischer (Elektronik): http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4b/Mischer_2.svg/2000px-Mischer_2.svg.png

12.Danksagung

Unser Dank gilt vor allem unserem Betreuer Thomas Biedermann, der uns immer mit Rat und Tat zur Seite steht und ohne den dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre. Außerdem möchten wir uns bei seiner Frau Susanne Biedermann bedanken, da sie sich immer um unser leibliches Wohlergehen gekümmert und uns mit leckerem Essen, Kuchen und Trinken versorgt hat. Auch bedanken wir uns beim Max-Planck Institut für Radioastronomie Bonn/Effelsberg, die uns für 3 Tage bei sich untergebracht haben und sich für uns Zeit genommen haben, um uns mit weiteren Grundlagen der Radioastronomie vertraut zu machen.

Anhang: Bilder der Benutzeroberfläche(S. 13, 14), Schaltplan(S.15)



The screenshot displays the 'VCO-K8055-Interface' software window in the 'Parameter' configuration mode. The interface includes a menu bar with 'VCO-Steuerung', 'Parameter', 'Interface-Test', and 'Viewer'. The main area contains several input fields and controls for parameter configuration:

- Startfrequenz: 195 MHz
- Stopfrequenz: 2000 (1999) MHz
- Schrittweite: 4 MHz
- Anzahl Schritte: 451
- Switchfrequenz: 850 MHz
- Mischfrequenz: 2250 MHz
- Abtastrate: 10 ms
- Mittelwerte über: 1 Messwerte
- Resultierende Messzeit: 4,51 s
- Messung: S1.1, S2.1
- Kalibration:
- Dämpfung: 0 dB
- Zu Testendes Bauteil:

At the bottom of the window, there are buttons for 'USB-Interface trennen', a checkbox for 'Viewer Benutzen', and a 'Beenden' button.

