

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

**zur Erlangung des Grades eines „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik**

**Thema: „Konzepterstellung, Realisierung und Verifizierung eines
Messplatzes zur Untersuchung von Umwelteinflüssen auf
Hochfrequenzkomponenten“**

Eingereicht von: Eric Schmieder

Angefertigt für: Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und
Radartechnik FHR, Wachtberg

Matrikel: E 2011

Ausgabetermin: 23. Februar 2015

Abgabetermin: 4. Mai 2015

Schulischer Betreuer: Herr Dr. techn. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr Dipl.-Ing. Dirk Nüßler

I. Kurzfassung

Alle Komponenten der Hochfrequenztechnik sind bei jedem Anwendungszweck unterschiedlichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Um einzelne Bauteile oder verschiedene Baugruppen auf ihr Verhalten unter verschiedenen Umweltbedingungen zu untersuchen und um eine stabile Funktionsweise bei diesen zu gewährleisten, wurde ein Messplatz konzipiert, entwickelt und verifiziert. Zur Ansteuerung wurde Labview als Programmierumgebung verwendet. In dieser Arbeit wird nachfolgend auf die Grundlagen dieser Thematik, die verwendeten Geräte mit dazugehörigem Aufbau und die Programmierung in Labview erläutert. Abschließend wird auf die verschiedenen Verifizierungsmessungen eingegangen. Bei diesen wurde ein Verstärker mithilfe eines vektoriiellen Netzwerkanalysators auf seine Charakteristiken bei verschiedenen Temperaturen untersucht, und mit den Kennwerten des Herstellers verglichen.

II. Abstract

All components of the high-frequency technology are exposed to different environmental conditions. To examine individual components or different modules on their behavior under various environmental conditions and to ensure and to provide a stable operation, a test station was designed, developed and verified. To control this test station, Labview was used as programming environment. This paper deals with the foundations of this topic, the various devices that were used with the associated construction and the programming in Labview. Finally, it discusses the different verification measurements. In these, an amplifier was examined with a vectorial network analyzer, to get the individual characteristics at various temperatures, and compared with the parameters of the manufacturer.

III. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AM	Amplitudenmodulation
DUT	Device under test
FFT	Fast Fourier Transform
FHP	Forschungsinstitut für Hochfrequenzphysik
FHR	Hochfrequenzphysik und Radartechnik
FM	Frequenzmodulation
FSK	Frequency Shift Keying
GPIO	General Purpose Interface Bus
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface
IC	Integrated Circuit
IMD ₃	Intermodulation distortion third order
IP3	Intercept point third order
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LNA	Low Noise Amplifier
MHS	Millimeterwellen und Höchsthfrequenzsensoren
NWA	Netzwerkanalysator
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSL	Open-Short-Load
PM	Phasenmodulation
RS-232	Recommended Standard 232
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
SNR	Signal-to-noise-ratio
SOLT	Short-Open-Load-Trough
SWR	Standing Wave Ratio
TAN	Through-Attenuation-Network
TDR	Time Domain Reflection
TRL	Through-Reflect-Line
USB	Universal Serial Bus
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VI	Virtuelle Instrumente
VNA	Vektorieller Netzwerkanalysator

Tabelle 1: Abkürzungstabelle

IV. Physikalische Konstanten und Symbole

Konstante	Größe	Einheit	Beschreibung
c_0	$2,99792458 \cdot 10^8$	ms^{-1}	Vakuumlichtgeschwindigkeit
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	N/A^2	Magnetische Feldkonstante
ε_0	$8,85418717 \cdot 10^{-12}$	As/Vm	Elektrische Feldkonstante
k	$1,3806488 \cdot 10^{-23}$	J/K	Boltzmann-Konstante

Tabelle 2: Physikalische Konstanten und Symbole

V. Größeneinheiten

Einheitenpräfix	Größe	Beschreibung
T	10^{12}	Tera
G	10^9	Giga
M	10^6	Mega
k	10^3	Kilo
m	10^{-3}	Milli
μ	10^{-6}	Mikro
n	10^{-9}	Nano
p	10^{-12}	Piko

Tabelle 3: Größenpräfixe und Beschreibung

VI. Umrechnungen

Einheit	Umrechnungsformel
dB	$10\log_{10}(\text{Linearwert})$
dBm	$10\log_{10}(P/1mW)$
dBW	$10\log_{10}(P/1W)$

Tabelle 4: Umrechnung Leistungspegel

Inhaltsverzeichnis

I.	KURZFASSUNG	II
II.	ABSTRACT.....	III
III.	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
IV.	PHYSIKALISCHE KONSTANTEN UND SYMBOLE	V
V.	GRÖßENEINHEITEN.....	V
VI.	UMRECHNUNGEN.....	V
1.	EINLEITUNG.....	1
1.1	ZIELSETZUNG UND MOTIVATION	1
1.2	BETREUENDES UNTERNEHMEN.....	4
1.3	BISHERIGER MESSPLATZ	5
2.	GRUNDLAGEN	7
2.1	PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1.1	<i>Elektromagnetische Welle</i>	7
2.1.2	<i>Rauschen</i>	10
2.1.3	<i>Leistungsanpassung</i>	12
2.1.4	<i>Verstärker</i>	15
2.1.5	<i>Kompressionspunkt</i>	18
2.1.6	<i>Intermodulationspunkt</i>	19
2.1.7	<i>Temperatureinfluss auf die Stabilität</i>	21
2.1.8	<i>Vektorieller Netzwerkanalysator</i>	23
2.1.8.1	<i>Funktionsweise</i>	24
2.1.8.2	<i>Streuparameter</i>	26
2.1.8.3	<i>Kalibrierung</i>	27
2.2	LABVIEW	29
3.	VERWENDETE GERÄTE	31
3.1	NETZWERKANALYSATOR ANRITSU SM6441-40.....	31
3.2	WEITERE GERÄTE	33
3.3	HOCHFREQUENZKABEL	35
4.	KONZEPT UND UMSETZUNG DES MESSAUFBAUS.....	36
4.1	HARDWARE	36
4.2	ANORDNUNG IM RACK.....	38
4.3	SOFTWAREKONZEPT UND IMPLEMENTIERUNG.....	39
4.3.1	<i>Gateway</i>	40
4.3.2	<i>Manuelle und automatisierte Messung</i>	44
4.4	DOKUMENTATION	45

5. VERIFIZIERUNG DES MESSPLATZES.....	46
5.1 VALIDIERUNG DES MESSPLATZES ANHAND DES VEKTORIELLEN NETZWERKANALYSATORS	46
5.1.1 Messobjekt.....	46
5.1.2 Verwendete Einstellungen und Aufnahme der Messwerte	47
5.2 DURCHFÜHRUNG UND EINFLUSS EINER KALIBRIERUNG	49
5.3 MESSUNG OHNE TEMPERATURREGELUNG DES GEHÄUSES.....	52
5.4 MESSUNG MIT TEMPERATURREGELUNG UND VERWENDUNG EINES KALIBRIERUNGSKITS	54
5.4.1 Messung der Verstärkung S_{21}	54
5.4.2 Messung der Einfügedämpfung S_{11}	57
5.4.3 Messung der Rückflusdämpfung S_{22}	59
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	61
6.1.1 Realisierter Messplatz.....	61
6.1.2 Softwarerealisierung	63
6.1.3 Ergebnisse der Verifizierung.....	64
VIII. TABELLENVERZEICHNIS.....	VIII
IX. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
X. ANLAGENVERZEICHNIS	XI
XI. SELBSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....	XII

1. Einleitung

1.1 Zielsetzung und Motivation

In der heutigen Zeit steigt die Bedeutung der Hochfrequenztechnik stetig an. Ein Beispiel hierfür ist die Kommunikationstechnik, bei der die maximale Datenübertragungsrate maßgeblich von der Bandbreite und dem Signal-Rausch-Verhältnis abhängt. Dies resultiert aus dem Shannon-Hartley-Theorem, das in der nachfolgenden Formel dargestellt ist,

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

wobei C die Kanalkapazität, B die Bandbreite und SNR das Signal-Rausch-Verhältnis darstellt. Da durch den Fortschritt der Technik immer größere Datenübertragungsraten abverlangt werden, wird versucht diese durch eine Erhöhung der Bandbreite und/oder eine Verbesserung des SNR zu realisieren. Das wiederum stellt immer höhere Anforderungen an die verwendeten Elemente innerhalb einer Baugruppe. Abgesehen von verschiedenen Leitungsarten, werden Elemente zur Stromversorgung, Frequenzerzeugung, aktive/passive Bauteile, Halbleiter, integrierte Schaltkreise und noch viele andere verwendet.

Aber auch bei anderen Teilgebieten der Hochfrequenztechnik werden diese Baugruppen zur Signalverarbeitung und –übertragung verwendet. Bei jedem Anwendungsfall sind diese verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Je nach verwendetem Material, wie Metalle, Halbleiter und Isolatoren, zeigen die verwendeten Bauteile unterschiedliche Eigenschaften durch den Einfluss von der Temperatur. Eine der wichtigsten Größen ist in diesem Zusammenhang der Leitwert. Dieser wird bei Metallen in erster Linie von der Beweglichkeit der Ladungsträger beeinflusst, die sich umgekehrt proportional zur Temperatur verhält.

Bei intrinsischen Halbleitern, also undotierten Halbleitern, tritt der identische Effekt auf. Diesem wirkt allerdings eine exponentielle Steigerung der Ladungsträgerdichte durch eine Temperaturerhöhung entgegen, wodurch die mangelnde Beweglichkeit der Elektronen vernachlässigt werden kann. Um die Leitfähigkeit von Halbleit-

tern, wie zum Beispiel Silizium weiter zu verbessern, werden diese mit Fremdatomen dotiert (extrinsische Halbleiter). Dadurch wird einerseits die Anzahl an Ladungsträgern erhöht, andererseits beeinflusst dies aber auch die Beweglichkeit. Ab einer bestimmten Temperatur, die abhängig vom Dotierelement und seiner Konzentration ist, sind alle Donatoren ionisiert, und der dotierte Halbleiter verhält sich wieder wie ein intrinsischer Halbleiter. Dadurch sinkt wiederum die Leitfähigkeit. Aus diesem Grund wird beispielsweise für dotierte Siliziumhalbleiterbauelemente eine maximale Betriebstemperatur von 125 °C angegeben. Die Leitfähigkeit von Halbleitern hat daraus resultierend Auswirkungen auf Bauelemente wie Transistoren. Bei diesen steigen mit höheren Temperaturen die Basis-Emitter-Spannung und damit der Basisstrom. Daraus ergibt sich ein höherer Kollektorstrom, wodurch sich der Arbeitspunkt verschiebt.

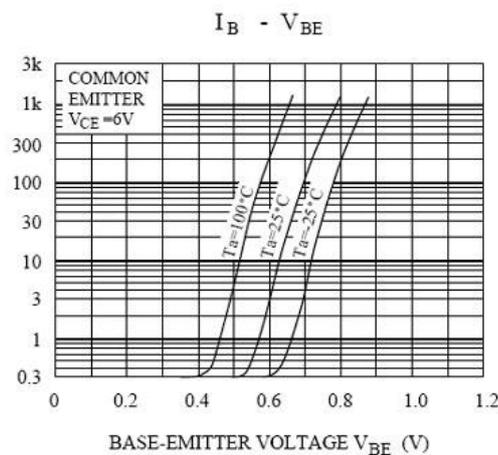


Abbildung 1: Kennlinien eines Transistors bei verschiedenen Temperaturen¹

Aufgrund dieses Sachverhalts und um eine stabile Funktionalität unter verschiedenen Umweltbedingungen zu gewährleisten, überprüfen Hersteller ihre Bauelemente und geben diese für einen gewissen Temperaturbereich frei, in dem das Produkt ordnungsgemäß betrieben und eingesetzt werden kann.

[1] <http://www.ne555.at/2014/index.php/elektronik-grundlagen/analogtechnik/281-transistor-kennlinienfelder?showall=1> [Stand: 09.02.2015]

Die nachfolgende Tabelle listet die gebräuchlichsten Betriebstemperaturbereiche auf, die in Datenblättern häufig zu finden sind:

Temperaturbereich	Bezeichnung	Typische Anwendung
0 °C bis +70 °C	Kommerzieller Temperaturbe-	Radio, TV, Computer
-40 °C bis +85 °C	Industrieller Temperaturbereich	Steuerungen und Rege-
-40 °C bis +125 °C	Automobil- Temperaturbereich	Motorsteuergerät, Senso-
-55 °C bis +125 °C	Militärischer Temperaturbereich	Funkgeräte, Messgeräte

Tabelle 5: Dauerbetriebstemperaturbereich²

Es gibt noch weitere Temperaturbereiche, diese vier stellen aber die geläufigsten Hauptbereiche der Industrie dar.

Aber nicht nur die Temperatur alleine wirkt sich auf die Bauteile aus. In verschiedenen Bereichen treten auch ganz unterschiedliche klimatische Bedingungen auf, die wiederum Einflüsse auf die Eigenschaften der einzelnen Komponenten haben. Um die Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse auf die verschiedenen Messobjekte überprüfen und erfassen zu können, werden unterschiedliche Geräte benötigt. Im Verlauf der Praxisphase wurde ein Messplatz entworfen, die Software zur Ansteuerung der Geräte konzipiert sowie implementiert und eine Dokumentation erstellt. Mithilfe dieses Messplatzes sollen die Auswirkungen von verschiedenen Umwelteinflüssen auf Bauteile untersucht, gemessen und protokolliert werden können. Hierbei ist es irrelevant ob diese selbst hergestellt, oder in einem Verbund mit anderen Komponenten in einer komplexen Baugruppe eingesetzt werden. Durch diese Messungen kann bei einem späteren Einsatz unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, eine ordnungsgemäße Funktionalität, sowie Stabilität gewährleistet werden.

In dieser Bachelorarbeit liegt das Hauptaugenmerk auf den Grundlagen, die zum Verständnis der Bachelorarbeit beitragen. Weiterhin wird auf den Aufbau des Messplatzes und dem eigenen Softwareteil in der Projektgruppe eingegangen. Zur Verifizierung des Messplatzes, wird der vektorielle Netzwerkanalysator der Firma Anritsu verwendet, dessen Funktionalität dargestellt, und eine Optimierung der

[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturbereiche_von_Elektronikbauelementen [Stand: 18.12.2014]

Messergebnisse durch verschiedene Verfahren wie Kalibrierung und Kühlung durchgeführt. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst sowie ausgewertet, und es wird ein Ausblick für den VNA und den Messplatz im Allgemeinen gegeben.

1.2 Betreuendes Unternehmen

Das Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) hat seinen Ursprung im Forschungsinstitut für Hochfrequenzphysik (FHP), das im Jahr 1957 gegründet wurde, und 1963 nach Wachtberg bei Bonn im Rhein-Sieg-Kreis umzog.



Abbildung 2: Fraunhofer FHR Standort Wachtberg³

Die Forschung des FHR bezieht sich hauptsächlich auf die Entwicklung von Verfahren und Systemen für elektromagnetische Sensorik, insbesondere im Bereich der Radartechnik. Dabei spielen vor allem die Signalverarbeitung und der Einsatz des Mikrowellen- bis hin zum Terahertzbereich eine wichtige Rolle. International hat man durch hervorgegangene Arbeiten, besonders im Bereich der Radaranwendungen, große Anerkennung erlangen können^{4,5}. Mit rund 280 Mitarbeitern ist das Fraunhofer FHR auch eines der größten Radarforschungsinstitute Europas.

[3] http://www.radarsummerschool.fraunhofer.de/summerschool/index.php?option=com_content&view=article&id=58:organiser-host&catid=34:allgemein&Itemid=65 [Stand: 09.02.2015]

[4] http://www.fhr.fraunhofer.de/de/das_institut.html [Stand: 18.12.2014]

[5] http://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer-Institut_f%C3%BCr_Hochfrequenzphysik_und_Radartechnik [Stand: 18.12.2014]

Es wird weiterhin in verschiedene Unterabteilungen mit separaten Forschungsschwerpunkten unterteilt.

Das sechsmonatige Praxissemester mit dazugehöriger Bachelorarbeitsphase wurde in der Abteilung für Millimeterwellen und Höchstfrequenzsensoren (MHS) absolviert. Die Abteilung zeichnet sich besonders durch Forschung und Entwicklung im Bereich aktiver und passiver Sensorsysteme im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich mit dazugehöriger Signalverarbeitung aus.⁶

Außerdem liegen die Forschungsaktivitäten in den folgenden Bereichen:

- Weiterentwicklung der Millimeterwellentechnologie
- Sensorik im THz-Bereich
- Phänomenologie und Simulation von Radarsignaturen
- Tarnung, Täuschung und Signaturmanagement
- Sensornahe Signalverarbeitung

1.3 Bisheriger Messplatz

Im Zeitraum von Oktober 2013 bis zum März 2014 wurde von Herrn Igor Klöp eine Bachelorarbeit mit dem Titel „Entwicklung und Realisierung eines Messplatzes zur Charakterisierung von Hochfrequenzsystemen bei variierenden Umweltbedingungen“ verfasst. Während dieser Zeit beschäftigte er sich mit verschiedenen Messgeräten und der Problematik der Implementierung von verschiedenen Geräten. Hauptaugenmerk war zur damaligen Zeit, dass alle Geräte über einen zentralen Rechner angesteuert werden können, und in den Grundzügen ein automatisiertes Programm erstellt wird. Daraus resultierend entstanden für die verwendeten Geräte auch erste Treiberdateien, die aber nicht den vollen Funktionsumfang der Geräte ausschöpfen konnten und nur rudimentär funktionierten. Außerdem wurde ein Prototyp zur manuellen und automatisierten Steuerung der Geräte erstellt. Es

[6] <http://wiki.fhr.fraunhofer.de/wiki/index.php/MHS> [Stand: 18.12.2014]

wurde während dieser Zeit eine solide Grundlage geschaffen, die zeigte, dass eine Umsetzung mit akzeptablem Aufwand möglich ist, sowie weiterführende Arbeiten sinnvoll sind. Für die Abteilung MHS stellt die Weiterführung dieses Messplatzes eine wertvolle Errungenschaft dar. Durch die Erweiterung der Messgeräte, sowie die Ausweitung der Funktionen der bereits vorhandenen Geräte, können viele Kennwerte ermittelt werden. Hierbei sind beispielsweise die S-Parameter, das Spektrum, der Frequenzgang und die Leistungsaufnahme zu nennen. Diese stellen aber nur einen kleinen Auszug von Messwerten dar, die mithilfe des Messplatzes ermittelt werden können.

2. Grundlagen

In Kapitel 3 wird auf die verschiedenen Geräte des konzipierten Messplatzes erläutert. In Kapitel 4 wird wiederum der endgültige Aufbau mit der dazugehörigen Software zur Ansteuerung der Geräte und im 5. Kapitel wird auf das Vorgehen zur Verifizierung des Messplatzes, anhand der Vermessung eines Messobjekts, eingegangen. Um das Zusammenspiel und die Eigenschaften verschiedener Bauteile und Geräte nachzuvollziehen zu können, wird in den nachfolgenden Unterkapiteln auf einige Grundlagen eingegangen. Um den Umfang in Grenzen zu halten, wird für weiterführende Informationen auf die verwendeten Quellen verwiesen.

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Elektromagnetische Welle

Die Grundlage der Elektrotechnik bilden die elektromagnetischen Wellen. Diese wurden von James Clerk Maxwell aufgrund mathematischer Gleichungen im Jahre 1865 erstmals theoretisch vorhergesagt. Erst 21 Jahre später gelang es dem Physiker Heinrich Hertz, diese auch experimentell nachzuweisen.

Bei einer elektromagnetischen Welle handelt es sich um Schwingungen des elektromagnetischen Feldes. Dieses besteht aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld. Diese Felder stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und zueinander.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Beziehung beider Felder zueinander dargestellt:

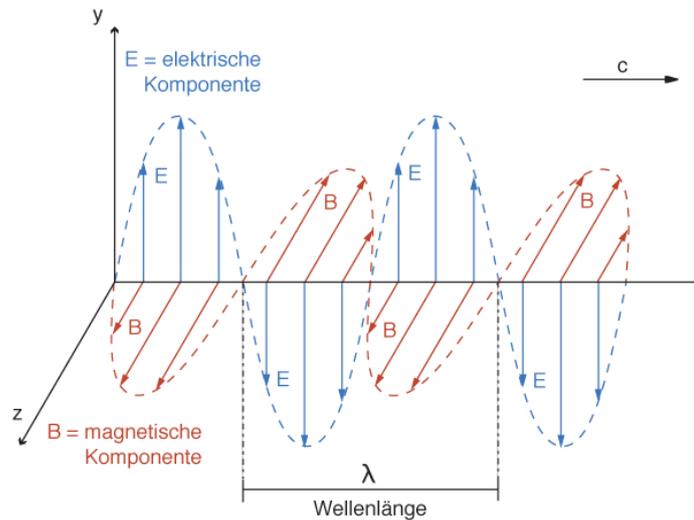


Abbildung 3: Darstellung einer ebenen Welle⁷

Aus den Gleichungen von Maxwell geht hervor, dass jede zeitliche Änderung des elektrischen Feldes mit einer räumlichen Änderung des magnetischen Feldes einhergeht. Dies gilt gleichermaßen für eine zeitliche Änderung des magnetischen Feldes. Des Weiteren ergibt sich auch, dass sich diese Felder als elektromagnetische Welle im Raum ausbreiten. Im Vakuum erfolgt die Ausbreitung mit der Lichtgeschwindigkeit. Dies wird durch die nachfolgende Formel ersichtlich,

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu_r \epsilon_r}} \quad (2)$$

wobei, c_0 der Lichtgeschwindigkeit, μ_0 der magnetischen Feldkonstante, ϵ_0 der elektrischen Feldkonstante, μ_r der relativen Permeabilität und ϵ_r der relative Permittivität entspricht. Da in jedem anderen Übertragungsmedium die relative Permeabilität oder die relative Permittivität ungleich Eins ist, ändert sich durch die Formel (2) auch die Phasengeschwindigkeit im jeweiligen Medium.

[7] <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/emwellen/ausbreitung.vlu.html>
[Stand: 10.01.2015]

Im Zusammenhang mit der Lichtgeschwindigkeit c , stehen auch die Wellenlänge λ und die Frequenz f :

$$c = f\lambda \quad (3)$$

Daraus ergibt sich wiederum, dass mit steigender Frequenz die Wellenlänge kleiner wird.

Im Allgemeinen kann eine elektromagnetische Welle durch die nachfolgende Formel charakterisiert werden. Hierbei wird die ebene Welle als Funktion an beliebigen Orten x im Zusammenhang zu beliebigen Zeiten t betrachtet.

$$y(x, t) = A \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x + \varphi\right) \quad (4)$$

In dieser Formel entspricht A der Amplitude, ω der Kreisfrequenz, λ der Wellenlänge und φ der Phasenverschiebung.

Die Gesamtheit aller Wellenlängen beziehungsweise aller Frequenzen ergeben das elektromagnetische Spektrum:

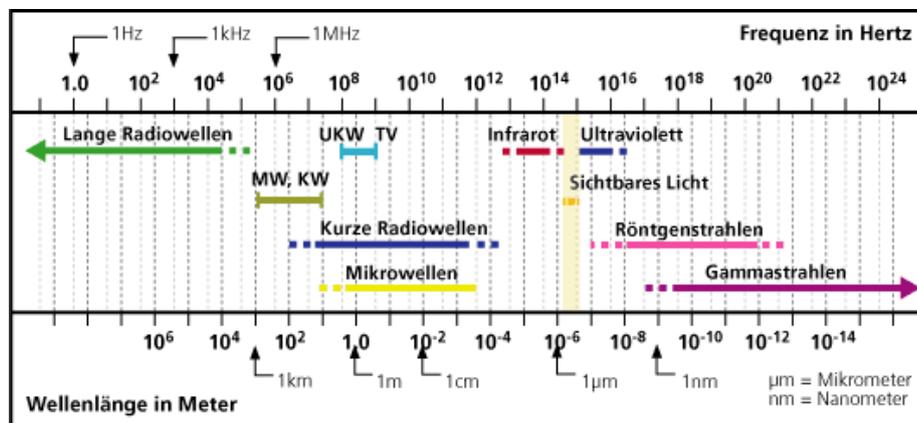


Abbildung 4: elektromagnetische Spektrum⁸

Aus der Anforderung an den Messplatz, einen Frequenzbereich bis zu 40 GHz abzudecken, ergibt sich aus der Abbildung 4 ein Arbeitsbereich vom Niederfrequenz- bis zum Millimeterwellenbereich.

[8] <http://www.teialehrbuch.de/Kostenlose-Kurse/Markup-Sprachen/16367-Elektromagnetische-Wellen-und-Licht.html> [Stand: 04.02.2015]

2.1.2 Rauschen

Bei der Sendung, Übertragung, Verstärkung oder dem Empfang von Signalen, zum Beispiel in Form von elektromagnetischen Wellen, werden diese über das komplette Frequenzspektrum durch das Rauschen gestört. Dieses ist elementar für die Hochfrequenztechnik, als auch für den erstellten Messplatz und die damit einhergehenden Messungen, und wird daher in diesem Kapitel näher erläutert.

Dass Rauschen ist eine der größten Störquellen und tritt mit unterschiedlicher Amplitude und Frequenz auf. Die Quellen für das Rauschen sind unterschiedlich und können innerhalb oder außerhalb einer Baugruppe liegen. Ein Beispiel für eine externe Rauschquelle ist das Hintergrundrauschen, das seinen Ursprung im Urknall hat. Im gleichen Zusammenhang sind Beispiele für Quellen des internen Rauschens:

- Schrotrauschen (weißes Rauschen, bspw. In Transistoren)
- Funkelrauschen (vernachlässigbar bei Frequenzen größer 10 MHz)
- $1/f$ -Rauschen (Bei niedrigen Frequenzen in Feldeffekttransistoren relevant)
- Thermische Rauschen

Für die weitere Arbeit ist das thermische Rauschen hervorzuheben. Hierbei handelt es sich um weißes additives Rauschen. Ab einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes fangen Elektronen an sich zufällig zu bewegen, was auch als brownische Bewegung bezeichnet wird. Diese resultiert daraus, dass durch die thermische Energie die Atome in Bewegung versetzt werden. Die Bewegung der Atome und damit der Elektronen ist wiederum gleichbedeutend mit einem Stromfluss. Somit entsteht für eine Momentaufnahme, je nachdem in welche Richtung sich die Elektronen bewegen, ein positiver oder negativer Strom. Aufgrund der Zufälligkeit der Bewegung ergibt sich auch eine zufällige Polarität, Amplitude und Frequenz.

Mit steigender Temperatur nimmt die Bewegung der Ladungsträger und damit einhergehend der Rauschstrom linear zu. In Anbetracht dieses Sachverhalts und im Zusammenhang mit einem ohmschen Widerstand schwankt dementsprechend

auch die Leerlaufspannung über die Zeit. Anhand der nachfolgenden Formel lässt sich die Leerlaufrauschspannung bestimmen:

$$U_R = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (5)$$

k = Boltzmann-Konstante; T = Absolute Temperatur; R = ohmscher Widerstand; Δf = Bandbreite (bezogen auf das Messgerät)

Durch diese Formel wird ersichtlich, dass die Rauschspannung, bei gleichbleibendem Widerstand, durch die Temperatur und die Bandbreite beeinflusst wird. Hierbei ist allerdings die Frequenz irrelevant. Das bedeutet, dass bei einer Bandbreite von 100 Hz bis 200 Hz die gleiche Rauschspannung wie bei einer Messung von 20100 Hz bis 20200 Hz auftritt.

Exemplarisch dazu ein Rechenbeispiel, das verdeutlicht, wie sich die Rauschspannung bei extremen Temperaturen verhält. Dazu wird die Formel (5) umgestellt, um die Rauschleistung zu erhalten. Es werden ein fester Widerstandswert von 50 Ω und ein Messgerät mit einer Bandbreite von 10 MHz angenommen. Für die Temperatur werden die Maximalwerte aus Tabelle 5 herangezogen. Dadurch ergibt sich für eine Temperatur von -55°C eine Rauschleistung von $P_R = 3,01 \cdot 10^{-14} \text{ W}$, oder ein Rauschpegel von $-105,21 \text{ dBm}$. Im äquivalent ergibt sich dazu eine Rauschleistung von $P_R = 5,49 \cdot 10^{-14} \text{ W}$, oder $-102,6 \text{ dBm}$, bei einer Temperatur von $+125^\circ\text{C}$. Aus den Rauschpegeln ergibt sich, nur durch die Temperaturänderung, eine Differenz von ca. 3 dBm. Dies entspricht einer Verdopplung der Rauschleistung.

Thermisches Rauschen stellt daher eine Problematik dar, da es sich zum eigentlichen Signal dazu addiert.

Dies verfälscht das Nutzsignal, wie man in Abbildung 5 erkennen kann:



Abbildung 5: Addition eines Signals mit Rauschen⁹

Um die Messfehler durch das Rauschen in den Messergebnissen zu minimieren, kann eine Mittelung von mehreren Messungen durchgeführt werden, da das weiße Rauschen gaußverteilt ist.

Eine weitere wichtige Kenngröße in der Nachrichtentechnik ist der Signal-Rausch-Abstand (SNR). Er spiegelt das Verhältnis von der mittleren Sendeleistung zur mittleren Rauschleistung wieder:

$$SNR = \frac{P_{Signal}}{P_{Rauschen}} \quad (6)$$

Durch diesen Wert lassen sich verschiedene Anwendungen und Bauteile, wie beispielsweise die Dynamik von Verstärkern, beurteilen. Um ein Signal vom Rauschen unterscheiden zu können, muss der SNR ausreichend groß sein.

2.1.3 Leistungsanpassung

Bei der Übertragung von Signalen können aufgrund von Fehlanpassungen unerwünschte Reflexionen auftreten. Daraus resultiert, dass nicht das komplette Maß an Leistung übertragen werden kann. Nachfolgend wird auf die Hintergründe und Ursachen von Fehlanpassungen und Reflexionen eingegangen, da diese für weitere Kapitel relevant sind.

Einer der fundamentalen Größen der Nachrichten- und Hochfrequenztechnik ist der Wellenwiderstand. Dieser ist definiert als der Eingangswiderstand einer homogenen Leitung mit einer unendlichen Länge. Im Gegensatz zur Impedanz ist der Wellenwiderstand frequenzunabhängig. Bei einem Koaxialkabel beispielsweise

[9] <http://electronics-for-beginners.com/pages/page/1080/> [Stand: 03.03.2015]

ergibt sich der Wellenwiderstand durch die Leitungsbeläge. In dem nachfolgenden Ersatzschaltbild ist dies schematisch dargestellt,

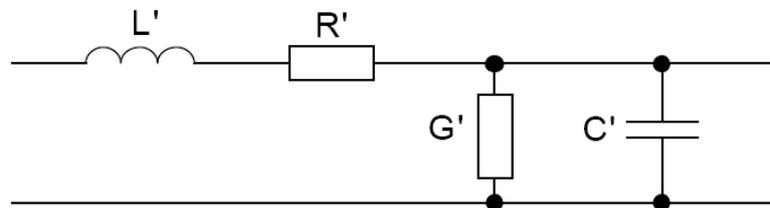


Abbildung 6: Ersatzschaltbild einer Leitung¹⁰

wobei L' den Induktivitätsbelag, C' den Kapazitätsbelag, R' den Widerstandsbelag und G' den Ableitungsbelag widerspiegelt.

Um einen maximalen Wirkungsgrad bei der Übertragung von Signalen über ein Medium zu erzielen, ist es notwendig, dass Bauteile aneinander angepasst werden. Ist die Impedanz einer Last gleich dem Wellenwiderstand einer Leitung, wird von Anpassung gesprochen. Werden Lasten nicht an Leitungen angepasst, treten am Ende der Leitung störende Reflexionen auf und die Leistung kann nicht vollständig übertragen (transmittiert) werden. In Abbildung 7 ist die Fehlanpassung einer Last an eine Signalquelle schematisch dargestellt:



Abbildung 7: Darstellung einer Fehlanpassung¹¹

Dabei wird der hinlaufende Impuls reflektiert, wodurch auf der Leitung zu dem hinlaufenden Spannungsimpuls ein zusätzlicher rücklaufender Spannungsimpuls entsteht.

[10] <http://home.arcor.de/wetec/rechner/czltng.htm>[Stand: 12.01.2014]

[11] <http://www.radartutorial.eu/druck/Leitungstechnik.pdf> [Stand: 11.02.2015]

Das Verhältnis von reflektierter Spannung zur hinlaufenden Spannung wird als Reflexionsfaktor bezeichnet und kann wie folgt berechnet werden:

$$r = \frac{U_{rück}}{U_{Hin}} = \frac{R_a - Z_L}{R_a + Z_L} \quad (7)$$

In Anlehnung an die Abbildung 7 ist in der Formel (7) Z_L der Wellenwiderstand und R_a der Abschlusswiderstand. Weiterhin ist $U_{rück}$ bzw. U_{Hin} die rück- bzw. hinlaufende Spannungsamplitude. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich folgendes Resultat:

- $R_a = Z_L$, dann ist $r = 0$. Leistungsanpassung ist vorhanden, die Leistung wird im vollem Umfang transmittiert und es tritt keine Reflexion auf
- $R_a \rightarrow \infty$, dann ist $r = 1$. Keine Leistungsanpassung vorhanden, die Leistung wird im vollem Umfang reflektiert. Beide Signale addieren sich und es ergibt sich die doppelte Spannung am Leitungsende (Leerlauf am Leitungsende)
- $R_a = 0$, dann ist $r = -1$. Keine Leistungsanpassung vorhanden, die Leistung wird im vollem Umfang reflektiert, aber das Vorzeichen der rücklaufenden Welle ändert sich. Dadurch ergibt sich eine Spannung am Leitungsende von 0 (Kurzschluss am Leitungsende)
- $r > 0$ und < 1 , dann ist die Lastimpedanz kleiner als der Wellenwiderstand der Leitung und ein Teil der Leistung wird am Übergang reflektiert
- $r < 0$ und > -1 , dann ist die Lastimpedanz größer als der Wellenwiderstand der Leitung und ein Teil der Leistung wird am Übergang reflektiert

In direktem Zusammenhang mit dem Reflexionsfaktor wird in Datenblättern auch oft das Stehwellenverhältnis (SWR) genannt. Dieses ist ein Maß für die Überlagerung der hin- und rücklaufenden Welle, die durch ihre Überlagerung eine stehende Welle ausbilden, und berechnet sich wie folgt:

$$SWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{U_{hin} + U_{rück}}{U_{hin} - U_{rück}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \quad (8)$$

Eine Fehlanpassung kann folgende Auswirkungen auf eine Schaltung haben:

- Leistungsverlust durch Reflexion am Ende der Leitung (bis zur Zerstörung von einzelnen Komponenten)
- Veränderung des Frequenzganges (Durch die Erwärmung des Mediums durch stehende Wellen, verändern sich seine Übertragungseigenschaften)
- Verschlechterung der Übertragungsqualität durch Interferenzen mit dem Nutzsignal
- Laufzeitfehler und/ oder Übertragung falscher Datenbits durch Überlagerung von Hin- und Rücklaufender Welle

Um eine Fehlanpassung zu vermeiden, werden einzelne Komponenten oder auch ganze Baugruppen überprüft. Die Überprüfung der Anpassung wird in der Regel mit einem Netzwerkanalysator realisiert.

2.1.4 Verstärker

Eine bedeutende Rolle spielen Verstärker in der Elektrotechnik. Sie werden dazu verwendet um Amplituden von Strom und Spannung bei einem Analogsignal zu erhöhen, was in der nachfolgenden Abbildung exemplarisch dargestellt wird:

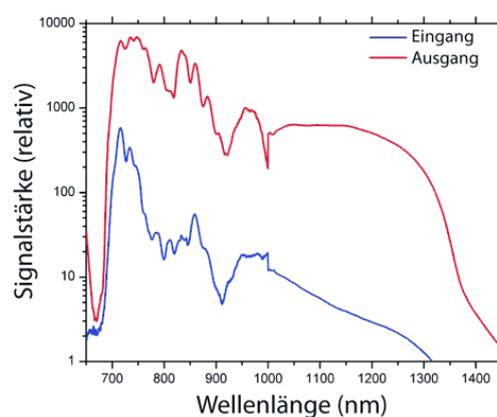


Abbildung 8: Beispielhafte Veranschaulichung einer Signalverstärkung ¹²

[12] http://www.mpg.de/1215868/Laser_Teilchenstrahlen [Stand: 03.03.2015]

Um eine größere Leistung am Ausgang im Vergleich zum Eingang zu gewährleisten, ist eine weitere Energiequelle notwendig.

Durch eine Verstärkung ist es möglich, Signale über größere Strecken zu übertragen, sowie empfangene Signale, die mit einer geringen Leistung empfangen wurden, vor der Verarbeitung zu verstärken (u.a. Mobilfunk). Im Allgemeinen ist ein Verstärker ein aktives Zwei- oder Mehrtor, das aus mindestens einem aktiven elektronischen Bauelement besteht. Dies kann unter anderem ein Transistor, eine Elektronenröhre oder ein Transduktor sein. Außerdem werden noch passive Bauelemente eingesetzt, um den Arbeitspunkt festzulegen und die Stabilität des Verstärkers zu gewährleisten.

In der Hochfrequenztechnik spielt besonders das Eigenrauschen eine besondere Rolle. Wie unter Kapitel 2.1.2 beschrieben, besteht ein Signal aus dem Nutzsignal und dem Rauschen. Während der Signalverarbeitung innerhalb eines Verstärkers wird sowohl die Amplitude des Nutzsignals als auch die des Rauschens gleichermaßen erhöht, und das Eigenrauschen des Verstärkers addiert sich zum Signal hinzu. Dieser Sachverhalt ist in der nachfolgenden Formel und in der Abbildung 9 dargestellt,

$$P_{ges} = P_1 + N_1 + N_V + G \quad (9)$$

wobei P_1 das Eingangssignal, N_1 das Rauschen, N_V das Eigenrauschen des Verstärkers und G den Verstärkungsfaktor darstellt.

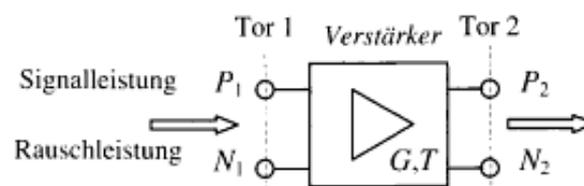


Abbildung 9: Signal mit Rauschleistung und Eigenrauschen des Verstärkers¹³

[13] Nachrichtenübertragungstechnik, Seite 142

Um den Einfluss des Eigenrauschens so gering wie möglich zu halten, finden besonders Low Noise Amplifier (LNA) großen Einsatz, da diese ein sehr geringes Eigenrauschen aufweisen. Dieses resultiert aus den Materialien des verwendeten Transistors und seiner Funktionsweise (z.B. GaAs-MeSFET¹⁴). Besonders in kaskadierten Verstärkerschaltungen, bei denen eine höhere Signalverstärkung erzielt wird, werden LNA's als erste Verstärkungsstufe eingesetzt, da das Gesamtuschen der Schaltung maßgeblich von der ersten Stufe beeinflusst wird. Dies resultiert aus der Friis'schen Formel (10), wobei F den Rauschfaktor bezeichnet. Die Indizes kennzeichnenden die Parameter von einzelnen Verstärkern in einer Kaskade:

$$F_{Ges} = F_1 + \frac{F_2-1}{G_1} + \frac{F_3-1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n-1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \quad (10)$$

Neben dem Eigenrauschen eines Verstärkers gibt es aber auch noch weitere wesentliche Kennwerte. Einige sind nachfolgend aufgeführt:

- **Verstärkungsfaktor:** Ist das Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsleistung. Er kann aber auch logarithmisch in dB angegeben werden.
- **Einfügedämpfung:** Ist ein Maß für die Eingangsanpassung und wird über den Parameter S_{11} ausgedrückt (Siehe Kapitel 2.1.8.2 Streuparameter)
- **Rückflussdämpfung:** Gibt Auskunft über die Anpassung des Verstärkerausgangs und wird über den Parameter S_{22} ausgedrückt
- **Maximale Eingangsleistung:** Kennzeichnet, bis zu welcher Leistung am Eingang ein Verstärker betrieben werden kann.
- **Bandbreite:** Bereich in dem der Verstärker seinen Arbeitsbereich hat.
- **Stromaufnahme und Betriebsspannung:** Einzustellende Spannung während der Verwendung und daraus resultierende Stromaufnahme
- **Temperaturkennlinie:** Verhalten verschiedener Kennwerte bei Temperaturänderung. Desto geringer der Temperatureinfluss, umso höher die Güte des Verstärkers.

[14] Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Seite F24 f.

2.1.5 Kompressionspunkt

Um bei einem Verstärker eine qualitative Aussage über die Linearität und somit über seine maximale Ausgangsleistung treffen zu können, wird der Kompressionspunkt, oder auch 1-dB-Kompressionspunkt, verwendet¹⁵. Da zur Charakterisierung eines Verstärkers der Kompressionspunkt mithilfe eines Netzwerkanalysators erfolgt, wird die Thematik nachfolgend erläutert.

Aus der Speisung eines Verstärkers mit Leistungen im Arbeitsbereich am Eingang ergibt sich die Ausgangsleistung, die sich aus der Summe der Eingangsleistung und des Verstärkungsfaktors ergibt. Voraussetzung dafür ist allerdings eine logarithmische Angabe der Werte.

$$P_{Aus} = P_{Ein} + G \quad (11)$$

In Formel (11) entspricht P_{Aus} der Leistung am Ausgang und P_{Ein} der Leistung am Eingang des Verstärkers. Solange das Verhältnis von Ein- und Ausgangsleistung linear ist, befindet sich der Verstärker im Verstärkungsbereich. Überschreitet die Eingangsleistung allerdings einen bestimmten Wert, reduziert sich die Verstärkung, da der Transistor in Sättigungsbereich betrieben wird. In diesem wird die Eingangsleistung nicht mehr um den Verstärkungsfaktor erhöht. Durch eine Interpolation der Kennlinie die sich aus Eingangs- und Ausgangsleistung ergibt, lässt sich der Kompressionspunkt ermitteln. Sobald der reale Verlauf der Kennlinie um 1 dB von der interpolierten Kennlinie abweicht, ist der Kompressionspunkt erreicht.

[15] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kompressionspunkt> [Stand: 08.01.2015]

Nachfolgend ist das Prinzip zur Ermittlung dargestellt:

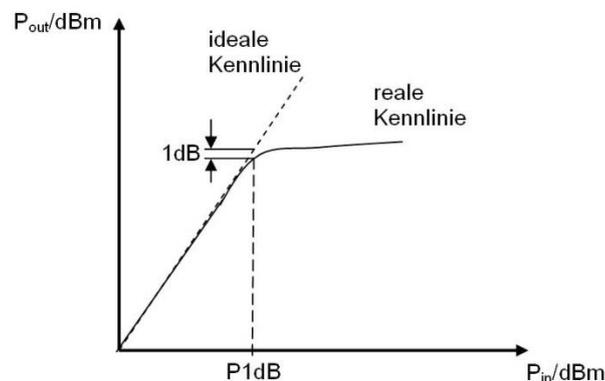


Abbildung 10: 1-dB-Kompressionspunkt¹⁶

Der Kompressionspunkt lässt sich auch für andere Größenabweichungen angeben, zum Beispiel 3dB von der interpolierten Kennlinie.

2.1.6 Intermodulationspunkt

Als weitere Kenngröße zur Charakterisierung eines Verstärkers, wird in den meisten Fällen der Intermodulationspunkt angegeben, und damit einhergehend seine nicht linearen Übertragungseigenschaften¹⁷. Dieser Kennwert kann sowohl für den Ein- als auch für den Ausgang eines Verstärkers erfasst werden, und resultiert aus den Intermodulationsprodukten. Diese sind dahingehend unerwünscht, da sie die Systemeffizienz und –qualität, durch Belegung der zur Verfügung stehenden Bandbreite und Störungen der Nachbarkanäle, beeinflussen.

Der Begriff Intermodulation bezeichnet die Bildung unerwünschter Signale, die bei der Verarbeitung von zwei oder mehr Frequenzen durch ein System mit nichtlinearer Übertragungsfunktion entstehen. Ursache ist das Verhalten des Transistors von Verstärkern, wenn die Eingangsleistung oberhalb seines maximalen Eingangspegels liegt, und er dadurch ein nichtlineares Verhalten aufweist

Nichtlinearitäten werden häufig durch eine Taylor-Reihenentwicklung der Übertra-

[16] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kompressionspunkt> [Stand: 10.03.2015]

[17] Grundlagen der vektoriellen Netzwerkanalyse, Seite 315 ff.

gungseigenschaften erstellt. Besonders relevant sind hierbei die Produkte dritter Ordnung, da diese sehr nah bei dem eigentlichen Nutzsignal liegen, und nicht gefiltert werden können.

Nachfolgend wird ein Eingangssignal angenommen, das aus der Überlagerung von zwei Sinusschwingungen, mit unterschiedlichen, aber nah beieinander liegenden Frequenzen (f_1 und f_2), besteht. In der Abbildung 11 sind die Intermodulationsprodukte der verschiedenen Ordnungen dargestellt, die sich aus dem Additionstheorem in Verbindung mit der Taylor-Reihenentwicklung ergibt,

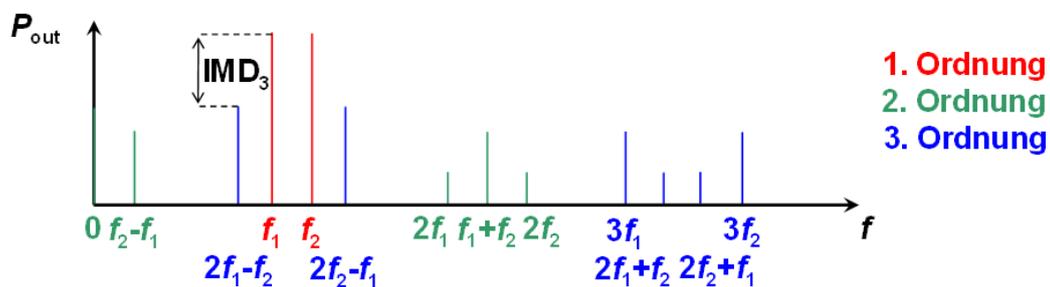


Abbildung 11: Intermodulationsprodukte im Spektrum¹⁸

wobei IMD_3 die Differenz, zwischen der Grundwelle und des Intermodulationsproduktes darstellt. Relevant ist bei diesem Sachverhalt, dass sich der Pegel des Intermodulationsproduktes der Ordnung N um $N \cdot \Delta$ dB ändert, wenn sich der Pegel der Grundwelle um Δ dB ändert. Aus diesem Sachverhalt lässt sich der Intermodulationspunkt dritter Ordnung bestimmen. Da dieser sich nicht durch Messungen erfassen lässt, handelt es sich bei dem IP3-Punkt um einen fiktiven Wert. Um eine Aussage über diesen treffen zu können, werden die Ausgangsleistungen der Grundwelle und der Intermodulation dritter Ordnung aufgetragen und linear interpoliert.

[18] <http://www.uni-stuttgart.de/int/forschung/PA/Grundlagen/PA-Kenngroessen/Linearitaet.html>
[Stand: 09.03.2015]

Der daraus resultierende Schnittpunkt der Kurven bildet den Intermodulationspunkt dritter Ordnung (IP3), was beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist:

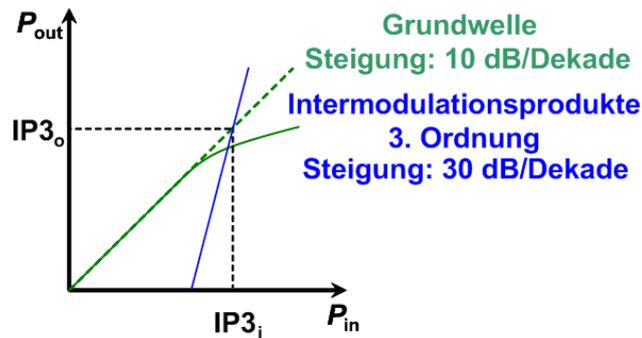


Abbildung 12: Bestimmung des Intermodulationspunktes dritter Ordnung¹⁷

Um die Intermodulation an einem Zweitor erfassen zu können, sind zwei Signalgeneratoren und ein Spektrumanalysator notwendig. Hierbei ist es zwingend notwendig, dass beide Signale einen identischen Leistungspegel aufweisen. Außerdem ist ein Leistungsteiler notwendig, um eine Signalzusammenführung zu realisieren. Eine Erfassung mit einem Vier-Port-Netzwerkanalysator, der zwei Signalgeneratoren enthält, wäre mit weiteren Komponenten allerdings auch möglich.

2.1.7 Temperatureinfluss auf die Stabilität

Eine wichtige Grundlage bei der Auswahl oder des Entwurfs eines Verstärkers, ist neben den genannten Punkten die Stabilität. In erster Linie wird im nachfolgenden Abschnitt auf die Temperatureinflüsse eingegangen, da der Messplatz zur Untersuchung von diesen entwickelt wurde, und diese essentiell für die spätere Auswertung der Messwerte sind.

Die Stabilität von Verstärkern wird maßgeblich durch den verwendeten Transistor beeinflusst. Bei diesem sind wiederum der verwendete Halbleiter, der Dotierstoff und dessen Konzentration ausschlaggebend für das Verhalten bei verschiedenen Temperaturen. Mit steigender Temperatur treten bei dotierten Halbleitern verschiedene Effekte auf. Einerseits nimmt, wie bei Leitern (Metallen), die elektrische

Leitfähigkeit ab. Dies resultiert daraus, dass die Beweglichkeit der Ladungsträger, durch Zusammenstöße mit den Atomen, abnimmt. Die Verminderung der Beweglichkeit ist vorwiegend linear. Andererseits wird mit steigender Temperatur auch die Anzahl an beweglichen Ladungsträgern erhöht. Dies geschieht im Gegensatz zur Verminderung der Beweglichkeit nicht linear, sondern exponentiell. Aus diesem Grund steigt bei Halbleitern die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur. Ab einem bestimmten Temperaturwert (abhängig von der Dotiermenge und des verwendeten Stoffes) sind alle Ladungsträger ionisiert, und der dotierte Halbleiter weist Eigenschaften eines intrinsischen (undotierter) Halbleiters auf. Daraus resultiert, dass die Leitfähigkeit sinkt.

Dieses Verhalten von Halbleitern wirkt sich auf verschiedene Größen eines Transistors aus. Für den Sperrstrom und die Temperaturspannung ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit. Diese Größen haben Einfluss auf den Kollektorstrom und die Basis-Emitterspannung, die den Arbeitspunkt bestimmen. Eine Verschiebung des Arbeitspunktes durch Temperatureinfluss ist dahingehend unerwünscht, da hierdurch die Verlustleistung und damit der Verstärkungsfaktor beeinflusst wird.

Eine weitere Problematik für die Stabilität eines Verstärkers stellen ungewollte Verkopplungen innerhalb des Transistors dar¹⁹. Diese können galvanisch, induktiv oder kapazitiv sein. Das hat den Effekt, dass das verstärkte Signal wieder auf den Verstärkereingang zurückgeführt wird. Aus diesem Zusammenhang resultiert, dass der Verstärker Charakteristika eines Oszillators aufweist, und zu schwingen beginnt. Da eine Veränderung der Temperatur Einfluss auf die einzelnen Bauteile, sowie die Beschaffenheit von Leiterbahnen, hat, können die unerwünschten Verkopplungen negative sowie positive Effekte auf das Schaltverhalten haben. Um diese Effekte zu vermeiden, müssen verschiedene Aspekte bei einem Schaltungsentwurf berücksichtigt werden (siehe hierzu „Taschenbuch der Hochfrequenztechnik“, Seite F36).

[19] Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Seite F1 f., F5 ff.

2.1.8 Vektorieller Netzwerkanalysator

Um elektrische Bauteile zu charakterisieren und die Eigenschaften ganzer Baugruppen festzustellen, werden in der Elektrotechnik, besonders in der Schaltungsentwicklung und der Produktion, Netzwerkanalysatoren verwendet. Da ein Netzwerkanalysator zur Verifizierung verwendet wurde, werden die Funktionsweise und die Anwendungsgebiete nachfolgend erläutert. Außerdem ist eine Kalibrierung des Netzwerkanalysators unumgänglich, um zufriedenstellende Messergebnisse zu erhalten. Deshalb wird am Ende des Kapitels noch auf die verschiedenen Kalibrierstandards eingegangen, wobei die SOLT-Kalibrierung ausführlicher behandelt wird, da diese vor den abschließenden Messreihen durchgeführt wurde.

Netzwerkanalysatoren können die S-Parameter erfassen und aus diesen verschiedene Werte wie,

- SWR
- Impedanz (Betrag/ Phase oder Real- und Imaginärteil)
- Gruppenlaufzeit
- Signalverläufe im Zeitbereich (mithilfe der FFT)

ableiten. Durch diese Werte lassen sich beispielsweise Fehlanpassungen erkennen und eine möglichst verlustfreie Übertragung erzielen. Eine Grundlage bilden hierbei die Reflexions- und Transmissionseigenschaften die unter Punkt 2.1.3 erläutert wurden.

Zu unterscheiden ist bei Netzwerkanalysatoren zwischen skalaren und vektoriellen Netzwerkanalysatoren. Skalare Netzwerkanalysatoren weisen aber im Vergleich einen hohen Messfehler auf. Dieser kann beispielsweise aus der Breitbandigkeit der verwendeten Dioden-Detektoren, die die gesamte Ausgangsleistung eines Messobjekts einschließlich der Oberwellen anzeigen, resultieren²⁰. Deshalb, und da zur späteren Verifizierung des Messplatzes ein vektorieller Netzwerkanalysator eingesetzt wird, wird auch nur diese Untergruppe weiter erläutert und ist nachfolgend als Netzwerkanalysator zu verstehen oder kurz als VNA bezeichnet.

[20] http://www.amateurfunk-wiki.de/index.php/Netzwerkanalysator#Vor-_und_Nachteile_2
[Stand: 03.03.2015]

2.1.8.1 Funktionsweise

In diesem Kapitel wird die allgemeine Funktionsweise eines vektoriiellen Netzwerkanalysators beschrieben. Als Quelle wurden ²¹ und ²² verwendet.

Bei einem skalaren Netzwerkanalysator ist es nur möglich die Beträge des Reflektions- und Transmissionsfaktors zu messen. Der Vorteil eines vektoriiellen Netzwerkanalysators besteht darin, dass zusätzlich zum Betrag auch die Phase erfasst werden kann. Bei VNA's handelt es sich um mehr als komplexe Messgeräte. Um das Ausmaß der Arbeit in Grenzen zu halten, wird nachfolgend nur die rudimentäre Funktionsweise eines Netzwerkanalysators erläutert.

Im Allgemeinen besteht ein Netzwerkanalysator aus folgenden Grundkomponenten:

- **Signalgenerator:** Das Herzstück eines jeden Netzwerkanalysators ist ein wobbelbarer Signalgenerator, oder auch Synthesizer genannt. In Verbindung mit Phasenregelschleifen kann ein Signal erzeugt werden, das eine präzise Frequenzgenauigkeit, sowie ein geringes Phasenrauschen aufweist. Um höhere Frequenzen zu erreichen, werden außerdem Mischer oder Frequenzvervielfacher eingesetzt.
- **Test-Set:** Als weiteres Grundelement eines VNA ist das Test-Set zu nennen. Über einen Schalter kann das Signal vom Synthesizer zur Vorwärts- bzw. Rückwärtsmessung verwendet werden. Da zur Auswertung der späteren Messwerte das Sendesignal bekannt sein muss, wird dieses durch einen Leistungsteiler an das Messobjekt (DUT) und an einen Referenzkanal gesendet. Zu den Bestandteilen eines Test-Sets zählen außerdem mindestens zwei Tore, die auch Ports genannt werden. Über diese wird das Testobjekt angeschlossen, und die jeweiligen Messsignale aufgenommen. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, sind die Tore mit Richtkopplern verbunden. Diese dienen dazu, das reflektierte vom transmittierten Signal zu trennen. Die Genauigkeit eines VNA ist abhängig vom verwendeten Test-Set. Häufig

[21] Hochfrequenzmesstechnik, Seite 194 ff.

[22] Hochfrequenztechnik, Seite 11 ff.

werden Kenngrößen wie Frequenzbereich, -genauigkeit oder -auflösung angegeben. Hinzu kommen noch relevante Werte wie der Dynamikbereich und die Messgenauigkeit bei verschiedenen Leistungen (u.a.). Im Allgemeinen sinkt die Messgenauigkeit aber mit steigender Frequenz.

- Empfänger: Um die erhaltenen Messsignale auswerten zu können, müssen diese mit der Frequenz des Signalgenerators gemischt werden. Die dadurch resultierende Zwischenfrequenz enthält die eigentlichen Informationen über Amplitude und Phase und kann nach einer Analog-Digital-Wandlung an die Recheneinheit übertragen werden.
- Steuereinheit: Im Rechner wird die Koordination der einzelnen Komponenten durchgeführt. Außerdem werden die Daten für die jeweils anzuzeigende Messgröße aufgearbeitet und können an ein Anzeigeelement übergeben werden. Zur Korrektur von Messfehlern werden Kalibrierungen durchgeführt. Die dadurch erlangten Kalibrierkenngrößen werden von der Steuereinheit mit den eigentlichen Messwerten verrechnet.

Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten wird zum besseren Verständnis in Abbildung 13 dargestellt:

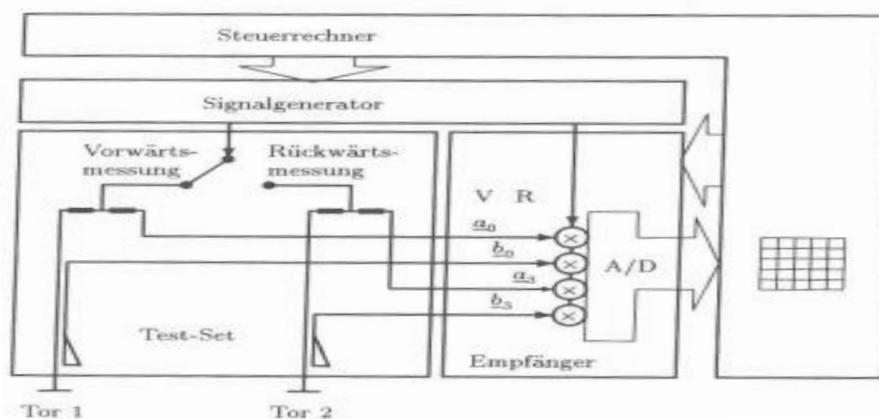


Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines VNA²³

[23] Hochfrequenztechnik- Lineare Modelle, Seite 94

2.1.8.2 Streuparameter

Bei Messungen mit einem VNA werden die sogenannten Streuparameter gemessen. Diese ergeben sich bei einem Testobjekt, beispielsweise Verstärker oder bei verschiedenen Formen von Filtern, wie einem Bandpass, wie folgt:

Zur Vermessung wird ein Signal an das Messobjekt gesendet. Da nur theoretisch eine vollständige Anpassung möglich ist, treten immer Reflexionen auf (siehe 2.1.3 Leistungsanpassung). Dies ist in der nachstehenden Zeichnung verdeutlicht:

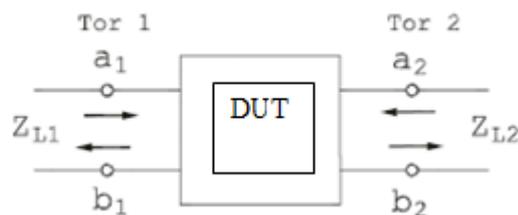


Abbildung 14: Zweitor mit hin- und rücklaufender Welle²⁴

Bei der Charakterisierung werden auch nicht die Spannungen und Ströme angegeben, sondern es wird von einer einfallenden und ausfallenden Welle gesprochen. Im Zusammenhang damit werden a_n und b_n über die hin- und rücklaufenden Ströme berechnet. Zur vollständigen Untersuchung eines Testobjekts ist es außerdem notwendig, dieses am Eingang sowie Ausgang zu untersuchen. Dadurch kennzeichnet in der Abbildung 14 die Größe a_1 die hinlaufende Wellenamplitude und b_1 die rauslaufende Wellenamplitude am Eingang. Für den Ausgang ergibt sich dementsprechend a_2 und b_2 als Wellenamplitude der hinlaufenden bzw. der rauslaufenden Welle.

[24] Hochfrequenztechnik, Seite 11

Über diese Kenngrößen werden dann die S-Parameter wie folgt definiert:

- $S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$ wobei $a_2=0$ ist (Keine Speisung am Tor 2)
- $S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$ wobei $a_2=0$
- $S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$ wobei $a_1=0$
- $S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$ wobei $a_1=0$

Bei der Darstellung der S-Parameter wird über die tiefgestellten Zahlen Aussage getroffen, welcher Port empfängt, und welcher sendet. Beispielsweise ist hier der Parameter S_{21} genannt. Die erste Zahl ist hierbei der Port, an dem gemessen wird, und die zweite Zahl ist der speisende Port. Durch diese Parameter lässt sich ein DUT vollständig charakterisieren. Die einzelnen Größen geben Aufschluss über die verschiedenen Kenngrößen:

- S_{11} = Eingangsreflexionsfaktor
- S_{21} = Vorwärtstransmissionsfaktor
- S_{12} = Rückwärtstransmissionsfaktor
- S_{22} = Ausgangsreflexionsfaktor

In der Praxis werden diese komplexen Größen vorwiegend logarithmisch in dB angegeben.

2.1.8.3 Kalibrierung

Alle Bauteile eines Netzwerkanalysators, sowie verschiedene Komponenten einer Übertragungsstrecke, sind fehlerbehaftet. Diese Fehler können zufällig, beispielsweise durch Rauschen, oder systematisch sein.

Systemfehler im Bauteil oder in der Übertragungsstrecke treten im Gegensatz zu den zufälligen Fehlern unverändert auf, und können reproduziert werden. Besonders bei hohen Frequenzen steigt die Größe der systematischen Messfehler an und kann nicht vernachlässigt werden. Um verwertbare Messergebnisse zu erhal-

ten, ist eine Fehlerkorrektur unerlässlich. Diese wird mithilfe einer Kalibrierung durchgeführt und ist vor jeder Messreihe unumgänglich.

Je nachdem ob ein einzelnes Bauteil, eine Baugruppe oder eine komplette Übertragungstrecke untersucht werden soll, müssen verschiedene Komponenten, wie Kupplungen, Übersetzer, Kabel u. a., mit in die Kalibrierung einbezogen werden.

Bei der Kalibrierung werden verschiedene Teile eines Kalibrierkits eingesetzt, deren Eigenschaften normiert und bekannt sind. Die einzelnen Komponenten des Kits weisen bezüglich ihrer Kenngrößen eine hohe Genauigkeit auf. Deshalb sind diese auch mit Sorgfalt zu behandeln.

Je nach Netzwerkanalysator können verschiedene Kalibrierstandards eingesetzt werden. Die Auswahl des Verfahrens ergibt sich über den entsprechenden Aufwand und die Genauigkeitsanforderungen an die Messresultate:

- OSL: Open-Short-Load
- TAN: Through-Attenuation-Network
- TRL: Through-Reflect-Line
- SOLT: Short-Open-Load-Through

Da für die später aufgeführten Referenzmessungen eine SOLT-Kalibrierung durchgeführt wurde, wird diese im nachfolgenden Teil näher erläutert.

Die SOLT-Kalibrierung werden insgesamt zwölf Fehlergrößen erfasst, weshalb sie auch 12-Term-Kalibrierung genannt wird²⁵. Bei dieser ergeben sich für ein Zweiport-VNA sieben Kalibrierschritte. Zuerst wird der Port 1 mithilfe verschiedener Komponenten kalibriert:

- OPEN: Definiert einen Zustand der Messleitung, an dem nichts angeschlossen ist. Wie unter Kapitel 2.1.3 erläutert, tritt eine Totalreflexion der elektromagnetischen Welle auf.
- SHORT: Definiert einen Zustand der Messleitung, wenn diese kurzgeschlossen wird. Auch hier tritt eine Totalreflexion auf, allerdings ist die Pha-

[25] <http://siart.de/lehre/nwa.pdf> [Stand: 12.02.2015]

se der Welle um 180° verschoben.

- LOAD: Definiert einen Zustand der Messleitung, bei der das Leitungsende mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen wird. Theoretisch treten keine Reflexionen auf.

Für den Port 2 ergibt sich eine identische Kalibrierabfolge wie für den Port 1. Anschließend wird ein letzter Kalibrierschritt durchgeführt:

- TROUGH: Definiert eine Verbindung von Port 1 und Port 2.

Im Normalfall wird bei jedem Schritt die vollständige Bandbreite des Netzwerkanalysators durchgestimmt (Sweep). Dadurch wird ersichtlich, wie sich die Systemfehler auf die verschiedenen Frequenzen auswirken. Für die einzelnen Verfahren lassen sich zur Verbesserung der Kalibrierung noch weitere Einstellungen treffen. Dies erhöht allerdings die Dauer für eine Kalibrierung.

Um den Vorgang zu beschleunigen und zu automatisieren, können auch Auto-Kalibrierungs-Kits (Autocal-Kits) eingesetzt werden. Diese haben auch standardisierte Komponenten für eine Kalibrierung verbaut, und schalten diese auf elektronischem Wege durch. Heutige Autocal-Kits weisen eine nahezu identische Kalibrierengenauigkeit im Vergleich zur 12-Term-Kalibrierung auf. Da die hohe Genauigkeit der SOLT-Kalibrierung für den Messplatz mehr als ausreichend ist, konnten die vergleichsweise hohen Kosten für ein Autocal-Kit nicht gerechtfertigt werden.

2.2 Labview

Das nachfolgende Kapitel erläutert in groben Zügen das Programmiersystem Labview der Firma National Instruments. Es wird nur ein allgemeiner Überblick über die Programmierumgebung gegeben werden, um ein Verständnis der weiteren Arbeit zu erlangen. Als Quelle wird Bezug auf den Artikel von Wikipedia genommen²⁶.

Der Name Labview bedeutet „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering

[26] <http://de.wikipedia.org/wiki/LabVIEW> [Stand:17.01.2015]

Workbench“. Haupteinsatzgebiet liegt in der Steuerung von Messgeräten oder Maschinen (u.a. Motoren) und die damit einhergehende Automatisierung von Prozessabläufen. Besondere Anwendung findet das Programm dadurch in der Automatisierungs- und Regelungstechnik.

Mit der Weiterentwicklung der Programmierumgebung sind heute aber auch komplexere mathematische Berechnungen, wie beispielsweise die FFT, möglich.

Eine Besonderheit liegt in der verwendeten Programmiersprache. In Labview wird mithilfe grafischer Bausteine (sog. VI's – Virtuelle Instrumente) in der Sprache „G“ programmiert. Hierbei spielt besonders das Datenflussprinzip eine Rolle, das bei der Programmierung berücksichtigt werden muss. Labview teilt sich in erster Linie in zwei Oberflächen auf:

- Frontpanel: Eingabe von verschiedenen Parametern und Ausgabe von Messwerten sowie weiteren Informationen in Form von verschiedensten Anzeigeelementen und Bedienelementen.
- Blockdiagramm: Ansicht des eigentlichen Programms, bestehend aus verschiedenen VI's und anderen Hilfsmitteln zur Programmierung, wie zum Beispiel Schleifen, Boolesche Abfragen und v.a.

Da in Labview das eigentliche Programm kompiliert wird, ist die Leistung mit anderen Hochsprachen vergleichbar. Seit kurzem ist mithilfe neuerer Geräte sogar eine Echtzeitverarbeitung möglich.

Ein weiterer Vorteil ist die Integrierung anderer Programmiersprachen. So ist es ohne weiteres möglich, Programmcodes aus Matlab oder auch C/C++ zu integrieren.

Zur Ansteuerung verschiedener Komponenten kann fast die komplette Bandbreite an Schnittstellen genutzt werden. Dies kann zum Beispiel USB; RS-232, GPIB, Ethernet o. ä. sein.

Da Labview vielfältig in der Industrie Einsatz kommt, stellen viele Hersteller für verschiedene Geräte Treiber zur Verfügung. In den Treiber-VI's sind die standardisierten Befehle bereits implementiert, und somit kann das Gerät umgehend verwendet werden.

3. Verwendete Geräte

3.1 Netzwerkanalysator Anritsu SM6441-40

Eine der Anforderungen an den Messplatz war es, den vektoriiellen Netzwerkanalysator aus der vorherigen Abschlussarbeit funktionell und noch effizienter einzusetzen. Bei dem VNA handelt es sich um ein SM6441-40 der Firma Anritsu. Dies ist eine OEM-Exemplar (Original Equipment Manufacturer), das für den Einsatz in selbst entworfenen Testsystemen gedacht ist.

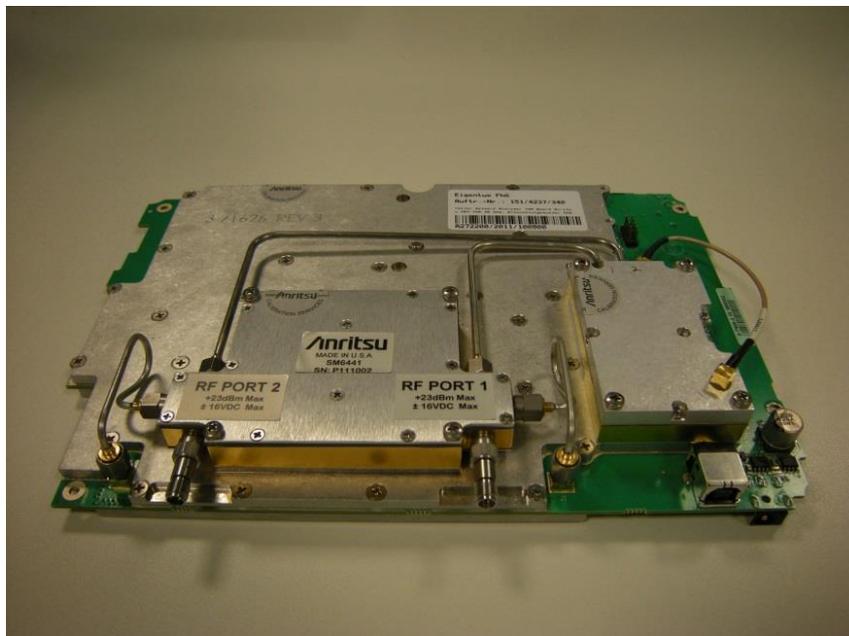


Abbildung 15: Anritsu SM6441

Wie man in der Abbildung erkennen kann, handelt es sich um einen Zweiport-VNA, bei dem Ports mit 2,92 mm-Konnektoren verbaut sind. Als Spannungsversorgung wird ein 12 V-DC Netzteil verwendet. Außerdem ist auf der Front noch ein USB-Anschluss zur Ansteuerung des Gerätes. Dies kann über das mitgelieferte Programm Vectorstar mit enthaltener GUI, oder separat über sogenannte SCPI-Befehle, realisiert werden. Eines der Grundvoraussetzungen um das Gerät extern fehlerfrei verwenden zu können, ist eine 32-Bit-Windows XP Version auf dem Rechner, auf dem Vectorstar installiert wird. Die genauen Installationsanweisungen sind in der Dokumentation zu finden.

Das Board bietet trotz der geringen Abmessungen sehr gute Spezifikationen. Neben einem Frequenzbereich bis zu 40 GHz, hat es eine Frequenzauflösung von 1Hz und einen Dynamikbereich von 90 dB. Andere wichtige Komponenten, die aus dem Test-Set resultieren, erfüllen die Anforderungen an den Messplatz mehr als ausreichend.

Um das Board geschützt im Rack unterzubringen, wurde es mitsamt eines Synthesizer-Boards der Firma Anritsu in einem Gehäuse installiert. Um eine optimale Betriebstemperatur zu erreichen, wurde dieses Gehäuse zusätzlich mit zwei Lüftern versehen. Durch diese wird bei Zimmertemperatur eine durchschnittliche Betriebstemperatur von 23°C erreicht, welche wiederum der optimalen Arbeitstemperatur des VNA entspricht. Zur Verdeutlichung ist in der nachfolgenden Abbildung oberhalb der Synthesizer und darunter der VNA zu erkennen.

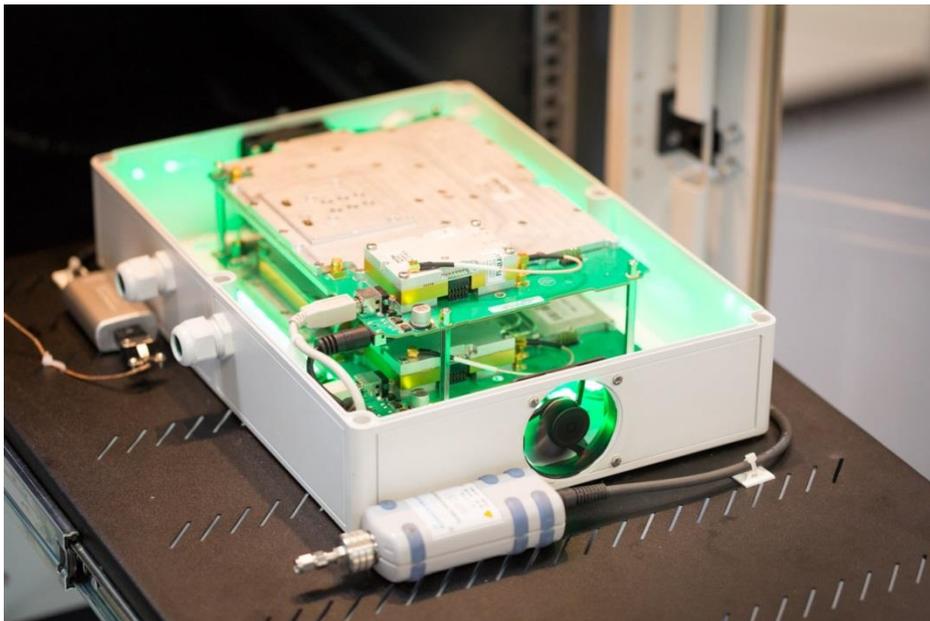


Abbildung 16: Gehäuse mit VNA und Synthesizer

Im Rack selbst ist neben dem Rechner, der das Messprogramm ausführt, ein separater Rechner für das Board installiert worden. Auf diesem wurde Windows XP installiert. Somit konnte die Modularität des Gesamtsystems weiter erhöht werden.

3.2 Weitere Geräte

Um ein breites Spektrum an Messmöglichkeiten gewährleisten zu können, wurden noch weitere Geräte verwendet. Diese werden nachfolgend erläutert und einige Kenndaten aufgeführt.

Weiss WK3

Um ein breiteres Spektrum an Messmöglichkeiten zu bieten, kamen noch andere Geräte hinzu. An erster Stelle ist der Klimaschrank „WK3“ der Firma Weiss zu nennen. Dieser wird zur praktischen Simulation von verschiedensten Umweltbedingungen verwendet. Der Klimaschrank kann Temperaturen im Bereich von -42 bis 180°C anfahren. Außerdem ist es möglich, für Temperaturen von 10 bis 95°C, die Luftfeuchtigkeit im Bereich von 10-98% einzustellen. Die einzelnen Befehle zur Steuerung werden über eine RS-232-Schnittstelle versendet.

NI TC01

Um die Temperatur direkt am DUT festzustellen, kommt ein Modul der Firma National Instruments zum Einsatz. Der Temperaturbereich, in dem Messungen durchgeführt werden können, wird durch das angeschlossene Thermoelement festgelegt. Bei dem verwendeten Thermoelement handelt es sich um den „Typ-K“, der laut DIN-Norm 60584 in einem Temperaturbereich von -270 bis 1372 °C eingesetzt werden kann²⁷. Dieser Bereich wird allerdings durch die Silikonummantelung von -50 bis +200°C begrenzt. Die Ansteuerung erfolgt bei dem Modul durch eine USB-Schnittstelle.

[27] http://www..de/cms/front_content.php?idcat=147 [Stand: 21.01.2015]

Hameg 4040

Da nicht nur passive, sondern auch aktive Bauelemente untersucht werden, ist eine externe Spannungsquelle unumgänglich. Für diese Zwecke wurde ein Netzgerät der Firma „Hameg“ verwendet. Der „Hameg 4040 ist in der Lage an den vorhandenen vier Kanälen 0 bis 32 V/0 bis 10 A auszugeben, wobei die maximale Ausgangsleistung auf 384 W begrenzt ist. Für einen Großteil der Testobjekte sind diese Kennwerte mehr als ausreichend.

R&S NRP-Z57

Zur Ermittlung von Signalleistungen kommt ein thermischer Leistungsmesser der Firma Rohde und Schwarz zum Einsatz. Dieser kann auch ohne ein Grundgerät verwendet werden. Der NRP-Z57 hat einen Messbereich von -35 dBm bis zu +20 dBm und eine Bandbreite von bis zu 67 GHz, was den maximalen Frequenzbereich in dem Messobjekte untersucht werden sollen, mehr als abdeckt. Der Anschluss an den Computer wurde über die USB-Schnittstelle realisiert.

R&S FSEK30

Bei verschiedenen Baugruppen ist in der Hochfrequenztechnik oft das Frequenzspektrum von großer Bedeutung. Um das Spektrum erfassen und untersuchen zu können, wird der „FSEK30“ der Firma Rohde und Schwarz verwendet. Dieser kann in einer Bandbreite von 1 kHz bis zu 40 GHz eingesetzt werden. Die Ansteuerung wurde wie bei dem „WK3“ über die RS-232-Schnittstelle realisiert.

Anritsu SM 65889

Um die verschiedensten Bauteile der Elektrotechnik zu untersuchen, wird meistens ein Frequenzgenerator benötigt. Aus diesem Grund wurde ein Synthesizer der Firma Anritsu verwendet. Der „SM 65889“ besitzt eine identische Bandbreite wie der VNA im Bereich von 1 MHz bis 40 GHz.

Rigol 1022

Des Weiteren findet noch ein Signalgenerator der Firma Rigol Verwendung. Die Besonderheit des „1022“ liegt in den unterschiedlichsten Formen des ausgegebenen Signals. Das Signal lässt sich sowohl als Sinus, Rechteck oder Sägezahn ausgeben. Die einzelnen Signalarten lassen sich in einem Frequenzbereich bis 20 MHz (5 MHz bei Rechtecksignal) erzeugen. Für verschiedene Anforderungen sind auch Modulationsarten wie AM, FM, PM und FSK möglich.

APC UPS SC 450

Da eine automatisierte Messreihe auch weit über einen Tag gehen kann, wurde in den Aufbau eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) berücksichtigt. So gehen im Falle eines Stromausfalls relevante Messwerte nicht verloren. Die USV der Firma APC hat eine Ausgangsleistung von 280W. Da an die USV nur die ausführenden PC's angeschlossen sind, reicht die abgegebene Leistung zur Abspeicherung der bisherigen Messwerte und zum kontrollierten Herunterfahren aus.

3.3 Hochfrequenzkabel

Die verwendeten Koaxialkabel sind mit besonderen Anforderungen verknüpft. Auf der einen Seite müssen die Kabel möglichst dämpfungsarm Signale mit einer Frequenz bis zu 40 GHz übertragen können. Auf der anderen Seite betrifft auch die Hitzebeständigkeit eine große Relevanz. Da die Bauteile in einem Temperaturbereich bis zu 180°C untersucht werden können, muss auch das Kabel für diesen Temperaturbereich, ohne Beschädigung oder eine nicht akzeptable Dämpfung, ausgelegt sein. Aus Kostengründen wurde sich für zwei verschiedene Kabel entschieden. Da für die Messungen maximal ein Zweitor in Frage kommt, wurden nur zwei hitzebeständige Kabel verwendet. Diese Kabel der Firma „Pro Nova“ weisen laut Datenblatt eine Dämpfung von 2,5 dB bei einer Frequenz von 40 GHz auf. Außerdem wurden diese mit einem 2.92mm-Stecker vorkonfektioniert geliefert. Im Rack selbst, wurden identische Kabel ohne Hitzebeständigkeit verwendet.

4. Konzept und Umsetzung des Messaufbaus

4.1 Hardware

Während der Konzeptionierung des Messplatzes, wurden einige Anforderungen an den eigentlichen Aufbau gestellt. Ein modularer Aufbau war einer der Grundbedingungen. Dies ließ sich nach mehreren Entwürfen am effektivsten in einem 19“-Rackschrank realisieren. Durch diese Form des Aufbaus ist auch ein einfacher Austausch von Geräten, oder die Erweiterung des Messplatzes möglich. Weiterhin ist durch den Einsatz eine übersichtliche Kabelführung realisiert worden können. Nachfolgend ist das Zusammenspiel der Messgeräte schematisch dargestellt:

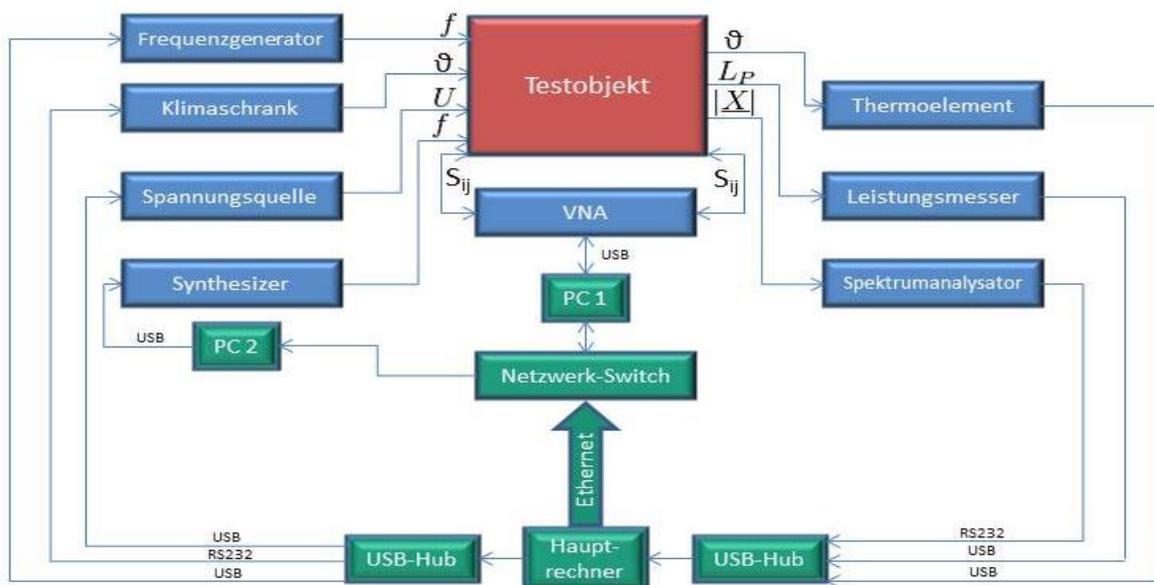


Abbildung 17: Kombination der einzelnen Geräte

Da der Messplatz auch ohne den Klimaschrank einen großen Umfang an verschiedenen Messgeräten bietet, wurde dieser durch eine Rollenmontage mobil einsetzbar gehalten. So ist es auch ohne weiteres möglich, verschiedene Messungen ohne Berücksichtigung verschiedener Umweltbedingungen an einem beliebigen Ort durchzuführen. Um in dieser Hinsicht eine noch einfachere Inbetriebnahme und Verwendung zu gewährleisten, wurden die Ein- bzw. Ausgänge von allen Messgeräten an die Seitenwand, und dann über einen Steckverbinder nach außen geführt. So muss für die Messung mit den temperaturbeständigen Kabeln

keine Änderung im Inneren des Racks vorgenommen werden. Um diesen Sachverhalt besser zu verdeutlichen, kann man in der

Abbildung 18: Rackseitenwand mit Übergängen

am oberen Rand (1) die Anschlüsse der vier Kanäle des Hameg sehen. Im unteren Bereich des Bildes (2) wurden die beiden Kanäle des Rigol, und daneben acht Wandstecker für eine Frequenz bis zu 40 GHz, nach außen geführt.

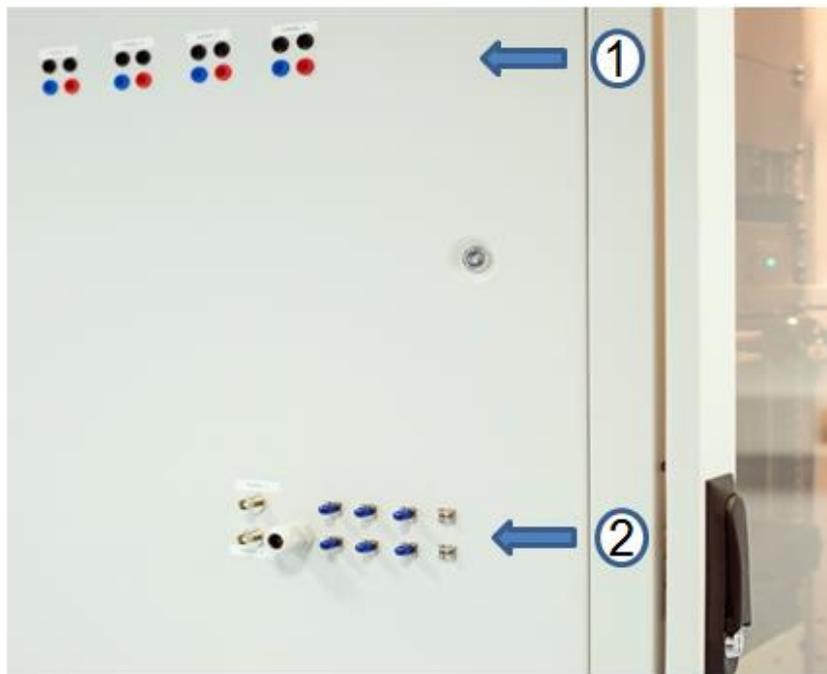


Abbildung 18: Rackseitenwand mit Übergängen

Um jederzeit einen voll einsatzbereiten Arbeitsplatz zu haben, wurde auch eine Kombination von ausziehbarem Monitor und Tastatur mit Mousepad eingebaut. So ist zur Arbeit und Visualisierung kein separater Tisch samt Monitor und Tastatur notwendig.

Da durch die Unterbringung von mehreren Rechnern, sowie einer Vielzahl von Messgeräten im Rack eine erhöhte Temperatur auftreten kann, wurde in die Decke des Schrankes ein Lüfter mit dazugehörigem Temperatursensor integriert. Dadurch wird eine Überhitzung oder eine etwaige Beschädigung der Geräte vermieden, und es kann eine optimale Arbeitstemperatur für die einzelnen Geräte geschaffen werden.

4.2 Anordnung im Rack

Nach einigen Überlegungen ergab sich folgende Anordnung der Geräte im Rack:

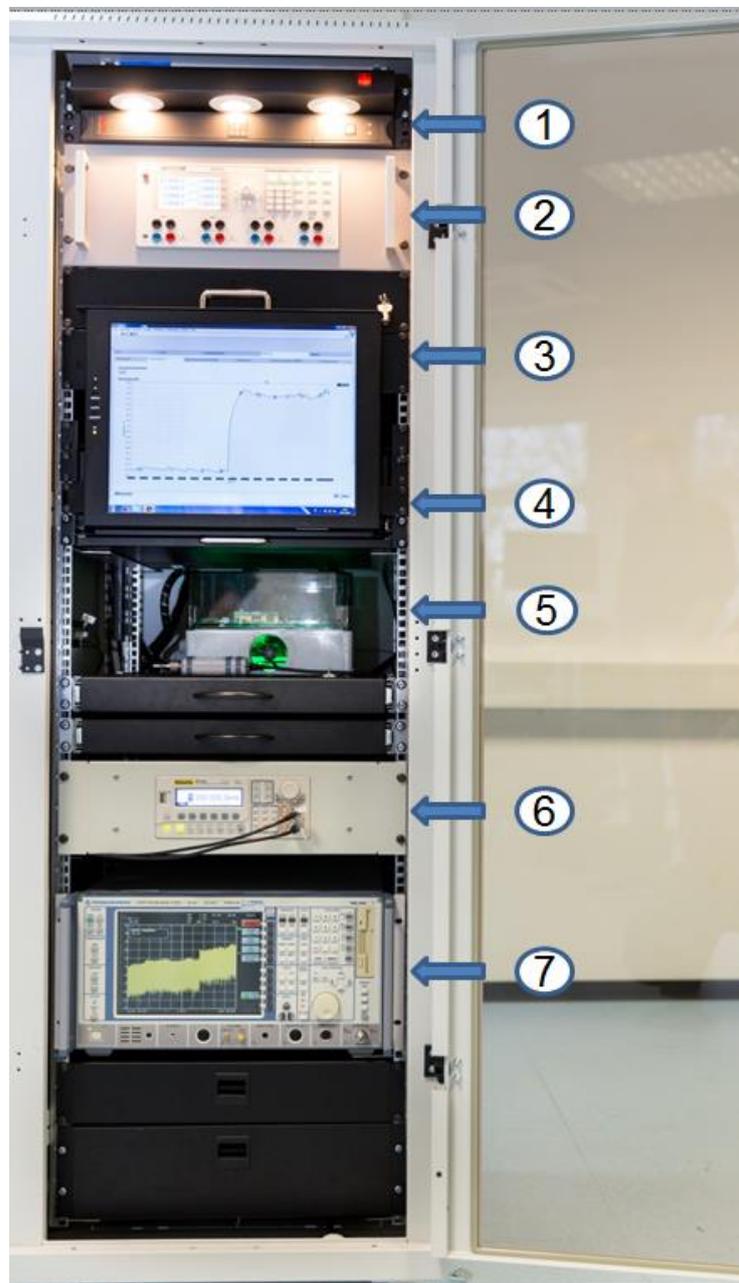


Abbildung 19: Rackaufbau

Wobei, [1]: USV, [2]: Netzteil; [3]: PC's; [4]: Multiswitch und Konsole; [5]: Messkarten, Leistungsmesser und Thermoelement; [6]: Frequenzgenerator; [7]: Spektrumanalysator; kennzeichnet.

Bei der Anordnung der Geräte standen zwei Aspekte im Vordergrund. In erster Hinsicht wurden die Geräte so angeordnet, dass eine problemlose Bedienung möglich ist. Dies galt in erster Linie für die Kombination aus Monitor und Tastatur. Die weitere Anordnung ergab sich durch die Überlegung, dass eine möglichst kurze Distanz zwischen den einzelnen Anschlüssen, der Geräte und der Seitenwand, erzielt werden soll. Dadurch wird eine möglichst kurze Leitungslänge realisiert, und ein unnötiger Leistungsverlust vermieden.

Hinter den verschiedenen Blenden können zur Messplatzerweiterung noch weitere Geräte verbaut werden.

4.3 Softwarekonzept und Implementierung

Um einen einheitlichen und stabilen Messplatz zu gewährleisten, müssen allein bei der verwendeten Programmiersprache viele Aspekte beachtet werden. Es wäre ohne weiteres möglich, jedes Messgerät mit einer separaten Sprache anzusteuern. Dies erschwert allerdings die Erweiterung sowie die Einarbeitung in das Programm. Außerdem wird so auch die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche erschwert.

Nach Rücksprache mit den beiden Mitarbeitern der Projektgruppe wurde sich für Labview als Programmierumgebung entschieden. Dies wurde durch mehrere Aspekte begründet. Einer der Vorteile in Labview ist es, dass man ohne einen großen Aufwand die meisten Geräte einbinden kann. Da sich Labview als Industriestandard, insbesondere in der Messtechnik, entwickelt hat, werden außerdem alle gängigen Schnittstellen unterstützt. Da viele Gerätehersteller außerdem Treiber für ihre Produkte bereitstellen, wird der Programmieraufwand reduziert. Zusätzlich lässt sich durch das Frontpanel in Labview mit einem geringen Aufwand eine intuitive und einheitliche Benutzeroberfläche schaffen. Durch Labview ergibt sich überdies der Vorteil, dass die einzelnen Teilmodule separat vor dem Zusammenführen in ein einheitliches Programm getestet werden können. So können Programmierfehler, im Gegensatz zu umfangreicheren und komplexeren Programmen, leichter gefunden werden.

4.3.1 Gateway

Ein modularer Aufbau sollte nicht nur in Hinsicht auf die Hardware, sondern auch in Anbetracht der Software, realisiert werden. Das bedeutet, dass durch den Austausch von Geräten, oder durch die Erweiterung des Messplatzes nur minimale Änderungen im Hauptprogramm notwendig sind. Um dies zu bewerkstelligen wurde ein sogenanntes Gateway in Labview erstellt. Dieses stellt ein Bindeglied zwischen dem auszuführenden Programm und den spezifischen Befehlen zur Ansteuerung der Geräte dar. Um die Funktionalität des Gateways zu verdeutlichen, wird auf die nachfolgende Abbildung verwiesen:

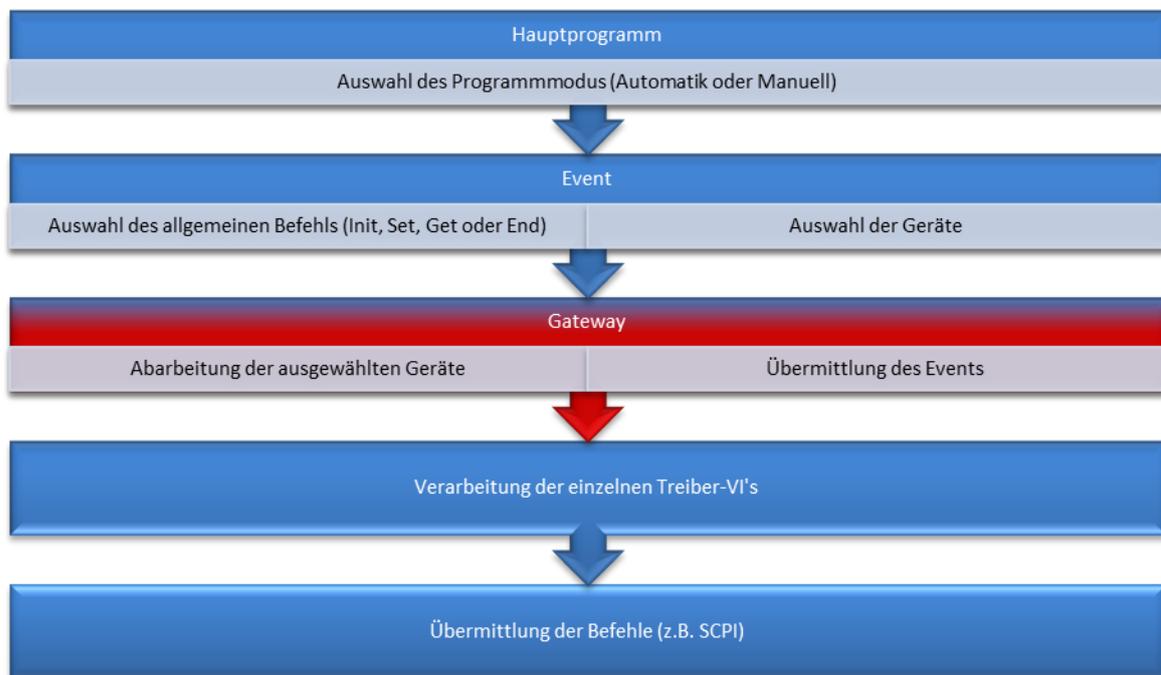


Abbildung 20: Hierarchie der Programmkomponenten

Bevor das Gateway programmiert werden konnte, musste ein Konzept für dieses erstellt werden. Im Anschluss wurde der Funktionsumfang der Geräte erfasst. Fundamentale Funktionen wurden nach eigenem Ermessen, und nach Rücksprache mit anderen Mitarbeitern der Abteilung MHS, in Labview programmiert.

Dabei wurden alle Gerätetreiber in vier verschiedene Cases nach folgendem Schema programmiert, und anschließend in ein Sub-VI hinzugefügt:

- Init: Initialisiert das Gerät und reserviert die angegebene Schnittstelle für die Kommunikation über Labview. Somit können keine Übertragungsfehler während der Kommunikation, durch beispielsweise andere Programme, auftreten.
- Set: Konfiguriert das Gerät nach denen im Frontpanel ausgewählten Parametern.
- Get: Liest bspw. die Messwerte aus dem Speicher des Geräts.
- End: Deninitialisiert das Gerät und schließt die Reservierung der Kommunikationsschnittstelle.

Die oben aufgeführte Einteilung in die Cases war notwendig, um einen symmetrischen Aufbau der Gerätetreiber zu gewährleisten. Dadurch lassen sich über einen Befehlsstring (bspw. „Init“) jedes Gerät ansprechen, ohne dass Informationen über die tatsächliche Befehlssyntax bei einem anderen Programmierer vorliegen. Bei Einhaltung dieses Schemas können auch unkompliziert neue Treiber hinzugefügt werden. Hiermit konnte ebenfalls eine Steigerung der Modularität erreicht werden. In der nachfolgenden Abbildung ist der Aufbau eine Treiber-Sub-VI's dargestellt. Als Beispiel wurde der Treiber des Klimaschranks verwendet:

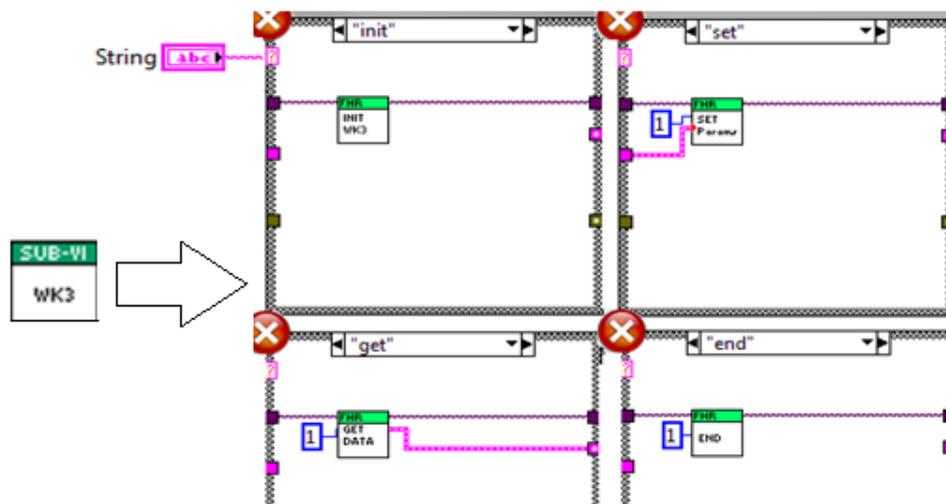


Abbildung 21: Treiber-VI des Klimaschranks aufgeteilt in seine Unter-VI's

Hierbei ist auch nochmal der Befehlsstring und die verschiedenen Sub-VI's zu erkennen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei dem Gateway ist ein Boolesches Array, in dem ausgewählt wird, welche Geräte bei der Messung verwendet werden. Dadurch können Ressourcen bei der Ausführung des Programms gespart werden, da nur ausgewählte Geräte verarbeitet werden.

Ein weiterer Grund, warum LabVIEW als Programmierumgebung zur Ansteuerung der Geräte verwendet wurde, ist das Datenflussprinzip. Durch dieses ist auch ein paralleles Ansprechen der Geräte, sowie Akquirieren der Messwerte, realisiert worden.

In der Abbildung 22 ist die finale Form des Gateway-VI's mit den dazugehörigen Anschlüssen dargestellt.

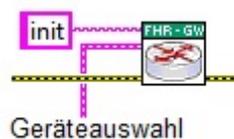


Abbildung 22: Gateway-VI mit Auswahlstring

Anschaulich ist hier nochmals der zuvor erwähnte Befehlsstring (als Beispiel „Init“) dargestellt. Außerdem wird über die darunterliegende Linie das Boolesche Array angeschlossen. Zum Erkennen von Fehlern, z.B. wenn ein Gerät angesprochen aber nicht eingeschaltet wurde, ist die dritte Linie zur Verarbeitung von Fehlerclustern vorhanden.

Im nachfolgenden Bild ist das Blockschaltbild des Gateways dargestellt:

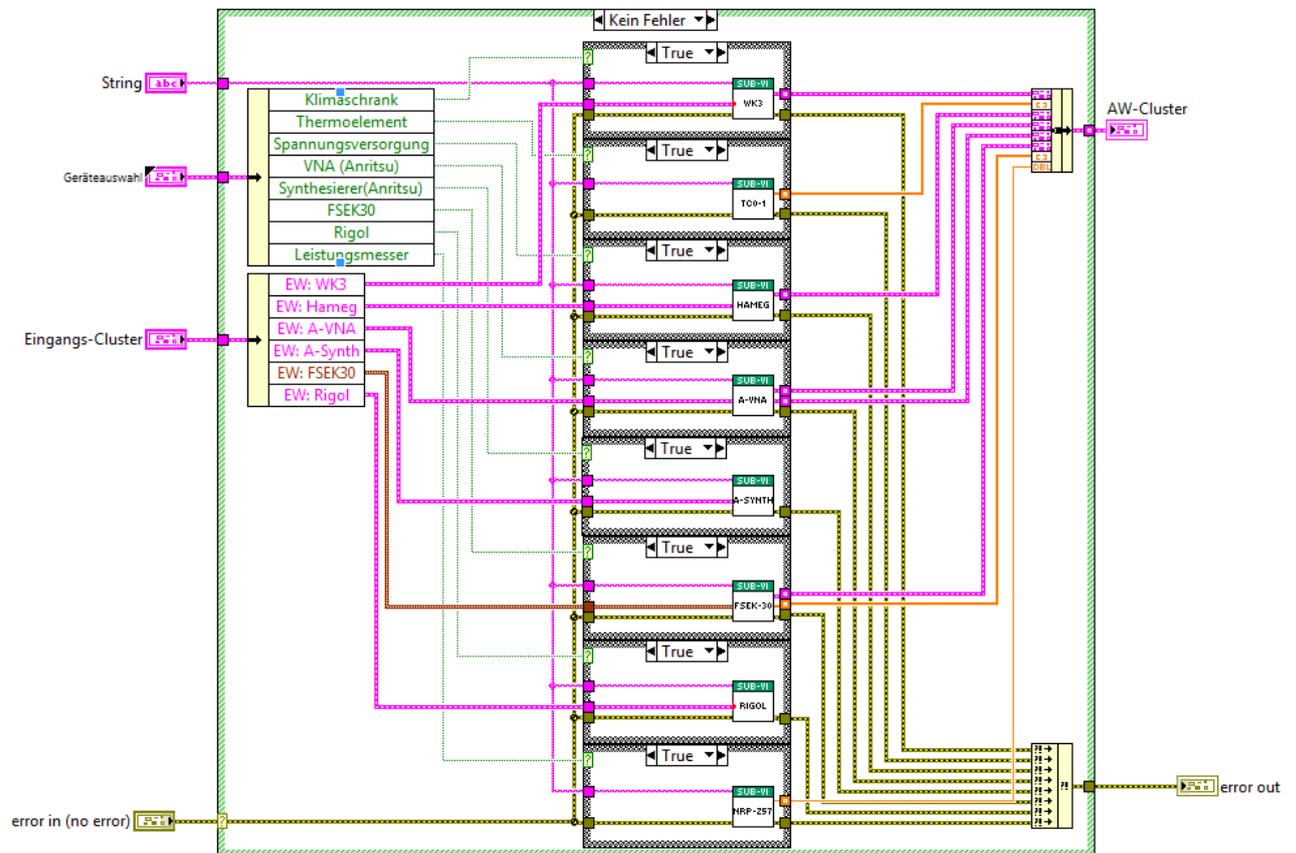


Abbildung 23: Blockdiagramm Gateway

In der Abbildung 23 ist neben dem Case-Auswahlstring nochmals das Boolesche Cluster, entsprechend der Bezeichnung der Geräte aufgeschlüsselt, zu sehen. Neben diesen beiden Eingangswerten ist noch das „Eingangs-Cluster“ zu nennen. In diesem sind die einzelnen Eingabewerte zur Konfigurierung enthalten, die an das jeweilige Treiber-VI weitergeleitet werden.

Im Äquivalent befindet sich an der rechten Seite das „AW-Cluster“ (Ausgabewert). In diesem werden alle Messwerte gesammelt, und zur Weiterverarbeitung im Hauptprogramm gebündelt.

Abschließend ist noch das Ein- und Ausgangserrorcluster zu nennen. Um im Falle eines Fehlers, die Ursache sofort lokalisieren zu können. Da dieses Cluster mit allen Treiber-VI's verbunden ist, ist eine direkte Fehlerzuordnung möglich.

4.3.2 Manuelle und automatisierte Messung

In der Phase des Praxissemesters und der Bachelorarbeit sollten in der Projektgruppe noch weitere Schwerpunkte abgearbeitet werden. Ein Teil davon war ein manuelles Messprogramm, das von Herrn Nolden bearbeitet wurde²⁸. In diesem fand unter anderem auch das erstellte Gateway seinen Einsatz. Das manuelle Programm wird später zur Verifizierung des VNA verwendet, da dadurch auch gleichzeitig eine Erprobung des Manuell-Programms realisiert werden kann. Zur Abspeicherung der Messwerte des VNA wird die erstellte Routine des „Manuell-Programms“ verwendet.

Als dritter Schwerpunkt ist die Arbeit von Herrn Münch zu nennen²⁹. Die Aufgabe bestand in der Erstellung eines automatischen Messprogramms, in dem verschiedene Profile und Messroutinen erstellt und abgespeichert werden können. Auch in diesem Teilprogramm wurde das erstellte Gateway eingesetzt.

[28] Bachelorarbeit: Nolden, Volker

[29] Bachelorarbeit: Münch, Steffen

4.4 Dokumentation

Eine weitere Anforderung neben der Modularität der Hard- sowie Software, war die Erstellung einer ausführlichen Dokumentation. Diese wurde in Hinsicht auf die vorhergehend aufgeführten Punkte im Laufe der Projektentwicklung entworfen und Schritt für Schritt erweitert. Somit kann ein Einarbeiten zur Verbesserung oder Erweiterung des Programms und seiner Komponenten vereinfacht und beschleunigt werden.

Innerhalb der Dokumentation waren u.a. die nachfolgenden Punkte relevant:

- Eine ausführliche Beschreibung des Quellcodes von Labview
- Erklärung der Abfolge bei der Installation von neuen Geräten, genauso wie eine Erläuterung, wie die vorhandenen Geräte installiert wurden
- Anleitung zur Inbetriebnahme der einzelnen Messgeräte und des kompletten Messplatzes und zur Benutzung der einzelnen Teilprogramme
- Welche Benutzer kann mit dem Messplatz arbeiten, und an welchem Speicherort werden die Messdaten abgelegt

5. Verifizierung des Messplatzes

5.1 Validierung des Messplatzes anhand des vektoriiellen Netzwerkanalysators

Um den kompletten Messplatzaufbau, sowie die Softwareansteuerung, zu verifizieren, wurde der Netzwerkanalysator als Messgerät ausgewählt. Wie unter Kapitel 4.3.2 erläutert, wurde dazu das manuelle Messprogramm verwendet. So konnte im Gegenzug auch sichergestellt werden, dass dieses fehlerfrei ausgeführt werden kann.

Ziel bei der Validierung des Messplatzes ist es, nahezu identische Messergebnisse, im Vergleich zu den angegebenen Kenndaten des Herstellers, zu erhalten. Sollten diese nachgebildet werden können, ist damit sichergestellt, dass die hergestellten Baugruppen der Abteilung MHS ausreichend und exakt auf ihr Verhalten unter verschiedenen Umweltbedingungen untersucht werden können.

5.1.1 Messobjekt

Als Testobjekt wurde ein rauscharmer Verstärker (Low Noise Amplifier) der Firma „Mini Circuits“ ausgewählt.

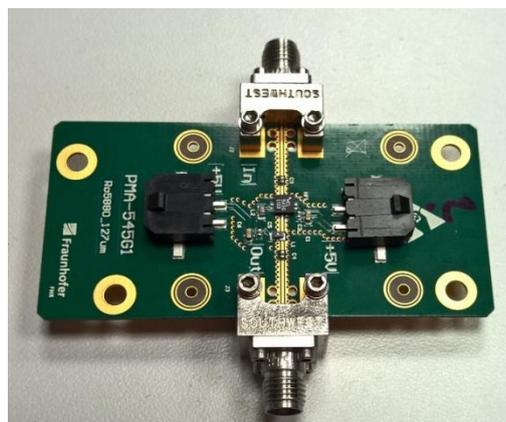


Abbildung 24: Verstärker PMA-545G1+

Bei dem PMA-545G1+ (Abbildung 24) handelt es sich um einen IC, der im Frequenzbereich von 0,4 bis 2,2 GHz betrieben werden kann, und über zwei Anschlüsse mit jeweils 5 V versorgt wird. Durch diesen Frequenzbereich ergeben sich unter anderem Anwendungsbereiche in der GSM- oder GPS-Technik. Zu den weiteren Kennwerten zählen eine Verstärkung, die je nach Frequenz des Eingangssignals zwischen 28,1 und 34,5 dB liegt, und eine Impedanz von 50 Ω .

Vor Beginn der Tätigkeit beim FHR wurde der Verstärker bereits mit der empfohlenen Grundschialtung auf eine Platine angebracht. Da der Verstärker in den verschiedensten Bereichen eingesetzt werden kann, können auch verschiedenste Einkopplungsverbindungsstücke verwendet werden. Diese waren aus diesem Grund nicht vormontiert. Um die Messfehler möglichst gering zu halten, wurde sich für das Modell mit 2,92 mm entschieden. Dadurch müssen keine Adapterstücke verwendet werden, die das Messergebnis verfälschen würden. Der Konnektor mit der Bezeichnung „1092-01A-5“ weist laut Datenblatt eine Dämpfung, im Frequenzbereich der Messung, von 0,3 dB und einen maximalen SWR von 1,18 auf.

5.1.2 Verwendete Einstellungen und Aufnahme der Messwerte

Die verwendeten Konfigurationen die am VNA getroffen wurden, leiteten sich so gut wie möglich von den getroffenen Parametern aus dem Datenblatt des Verstärkers ab. Dadurch ergab sich ein Frequenzsweep des Netzwerkanalysators von einer Startfrequenz von 0,2 GHz bis zu einer Stopffrequenz von 3 GHz.

Des Weiteren war in den Datenblättern des Verstärkers neben dem Frequenzbereich auch die Anzahl der Messpunkte ersichtlich. Es wurde in 5 MHz-Schritten Messpunkte aufgenommen. Daraus resultieren über die Bandbreite insgesamt 560 Messpunkte, die in identischer Weise bei dem VNA konfiguriert wurden. Im Datenblatt ist außerdem ersichtlich, dass Messungen wie die Verstärkung oder die Einfüge- und Rückflusdämpfung, mit einer Leistung von -25 dBm erstellt wurden.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem VNA nur um ein OEM-Board handelt, und ein Gehäuse mit weiterer Hardware nicht vorhanden ist, ist eine Einstellung der Sendeleistung nicht im vollen Umfang möglich gewesen. Dadurch ist wiederum eine Messung des 1-dB-Kompressionspunktes mit dem Netzwerkanalysator nicht möglich. Durch fehlenden Leistungsteiler, war auch keine Erfassung des Intercept-points dritter Ordnung möglich.

Erste Messungen ergaben, dass der Netzwerkanalysator mit ca. 10 dBm, Signale sendet. Da, wie unter Kapitel 3.1 erläutert, für den VNA nur eine maximale Eingangsleistung von 23 dBm zulässig ist, und der Verstärker einen Verstärkungsfaktor von 32,9 bis 26,1 dB laut Datenblatt aufweist (von 0,4 bis 2,2 GHz), wurde ein elektronisches-Dämpfungsglied verwendet, und auf 30 dB eingestellt. Dieses ist im VNA integriert und lässt sich softwareseitig in 10 dB-Schritten konfigurieren.

Durch die Programmierung der einzelnen Funktionen des VNA wurden für die verschiedenen Messungen Einstellungen wie S_{21} , S_{11} usw. getroffen. Als letzte essentielle Konfiguration wurde das entsprechende Aufnahmeformat ausgewählt. Aus diesem resultieren auch das entsprechend angezeigte Diagramm und dessen Beschriftung, sowie die eigentlichen Messwerte. Das Aufnahmeformat, oder auch „Traceformat“, kann zum Beispiel die Amplitude (mit oder ohne Phase) in linearer oder logarithmischer Darstellung, das Stehwellenverhältnis, oder auch die Impedanz beispielweise in einem Smith-Chart oder im Polardiagramm sein.

Bei allen nachfolgenden Messreihen wurden jeweils zehn Messungen durchgeführt, und von den Ergebnissen zur Fehlerminimierung der Mittelwert gebildet. So wird die Abweichung vom eigentlichen Wert durch weißes Rauschen minimiert, und die Aussagekraft der Messwerte erhöht.

5.2 Durchführung und Einfluss einer Kalibrierung

Eines der wichtigsten Punkte bei der Messung mittels eines Netzwerkanalysators ist die Kalibrierung. In diesem Kapitel soll nochmals verdeutlicht werden, wie notwendig diese ist. Als Messbeispiel wurde über die S_{21} -Parameter die Verstärkungskennlinie des PMA-545G1+ aufgenommen. Dazu wurde folgender Messaufbau verwendet, der in der nächsten Abbildung ersichtlich ist. Der Messaufbau war bei allen weiteren Messungen identisch.

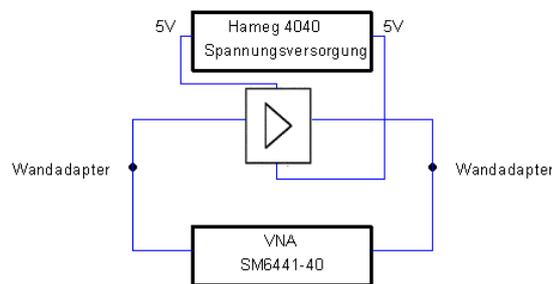


Abbildung 25: Blockschaltbild des Messaufbaus

In der nachfolgenden Abbildung sind die Kennlinie des Herstellers, sowie die Kennlinien, die mit dem VNA aufgenommen wurden, dargestellt:

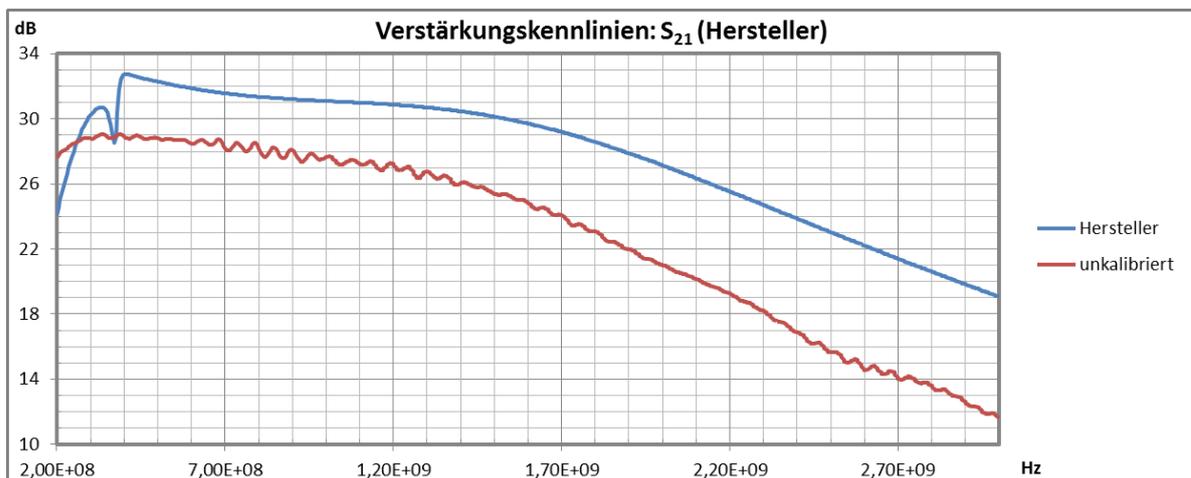


Abbildung 26: Vergleichsmessung ohne Kalibrierung

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, treten verhältnismäßig große Abweichungen auf. Diese sind anfangs noch gering, erhöhen sich aber mit steigender Frequenz an. Das liegt darin begründet, dass alle Komponenten, wie Kabel, Übergangsste-

cker und Konnektoren, bei verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Übertragungscharakteristika aufweisen. Im Betriebsfrequenzbereich des Verstärkers traten bei dieser Messung Abweichungen zwischen 2,8 und 6,2 dB auf, die nicht vernachlässigt werden können.

Für die Messung, mit vorhergegangener Kalibrierung, wurde sich für die Zweiport-SOLT-Kalibrierung mittels eines vorhandenen Kalibrierkits entschieden. Das Kit „85056“ der Firma HP/Agilent kann für Kalibrierungen im Bereich von DC bis zu 50 GHz bei 2,4 mm-Anschlüssen (oder 2,92 mm mittels Adapter) eingesetzt werden. Für die Kalibrierung war deshalb ein Adapter notwendig.

Um zufriedenstellende Messergebnisse zu erhalten, ist es zwingend notwendig, alle Komponenten bis zum DUT mit in die Kalibrierung einzubeziehen. Dies beinhaltet den Messaufbau, die verschiedenen Kabelsowie die Wandstecker. Die Parameter für die Kalibrierung wurden, wie unter Kapitel 5.1.2 erläutert, eingestellt. Hierzu wird während der 12-Term-Kalibrierung die vollständige Messstrecke hergestellt, aber anstatt des DUT, die einzelnen Kalibrierungsstücke verwendet.

Im nachstehenden Diagramm sind die unkalibrierten und die kalibrierten Messwerte, den angegebenen Werten des Herstellers gegenüber gestellt:

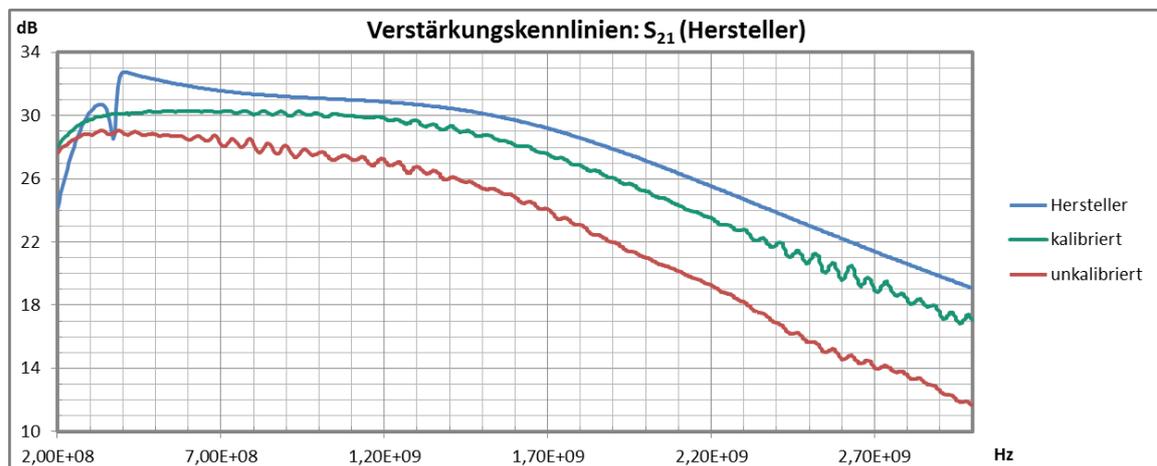


Abbildung 27: Vergleichsmessergebnis

Beim Vergleich der Kennlinie des Herstellers mit der kalibrierten Kennlinie ist ein sehr ähnlicher Verlauf erkennbar. Diese sind zwar nicht komplett identisch, es ist aber eine deutliche Verbesserung der Messwerte im Vergleich zur unkalibrierten Messkurve ersichtlich.

Die Abweichungen haben verschiedene Ursachen, da der Messaufbau des Herstellers nicht identisch nachgestellt werden konnte. Allein durch nicht identische Messgeräte, Kalibrierkits, Kabel usw. ergeben sich Abweichungen. Diese fallen aber, aufgrund der hohen Güte der verwendeten Komponenten und Geräte, gering aus. Ferner konnten bei dem Messaufbau auch nicht alle Komponenten der Übertragungsstrecke mit in die Kalibrierung einbezogen werden. Die Anschlüsse der Platine, auf der der Verstärker angebracht ist, konnten aufgrund ihres Aufbaus nicht mitkalibriert werden. Es wurde zwar versucht, Verbindungsstücke mit nahezu identischen Übertragungseigenschaften im Äquivalent mit in die Kalibrierung einzubeziehen, dies führte allerdings zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen.

Trotz dieser Abweichungen in der Kalibrierung traten nur geringe Unterschiede auf. Im Arbeitsbereich des Verstärkers, von 0,4 bis 2,2 GHz, traten zwischen den beiden Kennlinien nur Differenzen von maximal 1,5 dB auf.

Bei dem Vergleich der beiden Kennlinien des VNA, wird die essentielle Wichtigkeit der Kalibrierung noch ersichtlicher: Beide Kennlinien haben ähnliche Verläufe, aber wie zu erwarten war, wird mit steigender Frequenz der Unterschied der beiden Messwertreihen immer gravierender. Bei einem Vergleich der beiden Kennlinien bei 2,2 GHz beträgt die Abweichung ca. 5,8 dB.

Ein weiterer markanter Punkt in den drei Kennlinien ist der Bereich zwischen 0,7 und 2,2 GHz. Im Vergleich zu den Werten des Herstellers, treten sowohl bei der kalibrierten als auch bei der unkalibrierten Kennlinie Unregelmäßigkeiten auf, die in Form von Schwingungen der Kennlinie sichtbar sind. Diese sind durch Reflexionen, die durch Fehlanpassung im Messaufbau auftreten, begründet. Da die Konnektoren bei der Kalibrierung nicht berücksichtigt werden konnten, treten diese Schwingungen auch bei dieser Kennlinie auf. Die Schwingungen sind allerdings geringer, da durch die Kalibrierung Fehlanpassungen des restlichen Messaufbaus größtenteils korrigiert werden konnten.

Aufgrund der Messwerte konnte die Tatsache belegt werden, dass bei Arbeiten mit einem Messgerät mit dieser Präzision, die Kalibrierung unumgänglich ist. Würden Messungen ohne diese getätigt werden, wären die Messwerte zu stark von Fehlern behaftet, und nicht mehr aussagekräftig. Aus diesem Grund wird vor allen folgenden Messungen eine SOLT-Kalibrierung des VNA durchgeführt, und nicht in den nachfolgenden Kapiteln erwähnt. Sollten die Messungen merklich von den Messwerten des Herstellers abweichen, wird eine erneute Kalibrierung zur Fehlerkorrektur ohne schriftliche Erwähnung wiederholt.

5.3 Messung ohne Temperaturregelung des Gehäuses

Wie unter Kapitel 3.1 beschrieben, wurde das VNA-Board zusammen mit dem Synthesizer in einem Gehäuse verbaut. Bei dieser Testmessung wurde die verbaute Belüftung des Gehäuses ausgeschaltet, um die Temperatureinflüsse auf den Netzwerkanalysator darstellen zu können. Da laut Hersteller eine maximale Arbeitstemperatur von -40° bis 50°C angegeben ist, wurde mittels Thermoelement die Temperatur im Gehäuse gleichzeitig miterfasst. So konnte während der Messung ein Überschreiten der maximal zulässigen Temperatur vermieden werden. Zu Beginn der Messung herrschte im Gehäuse eine Temperatur von ca. 50°C .

Die dabei aufgezeichnete Kennlinie ist in der nachfolgenden Grafik dargestellt:

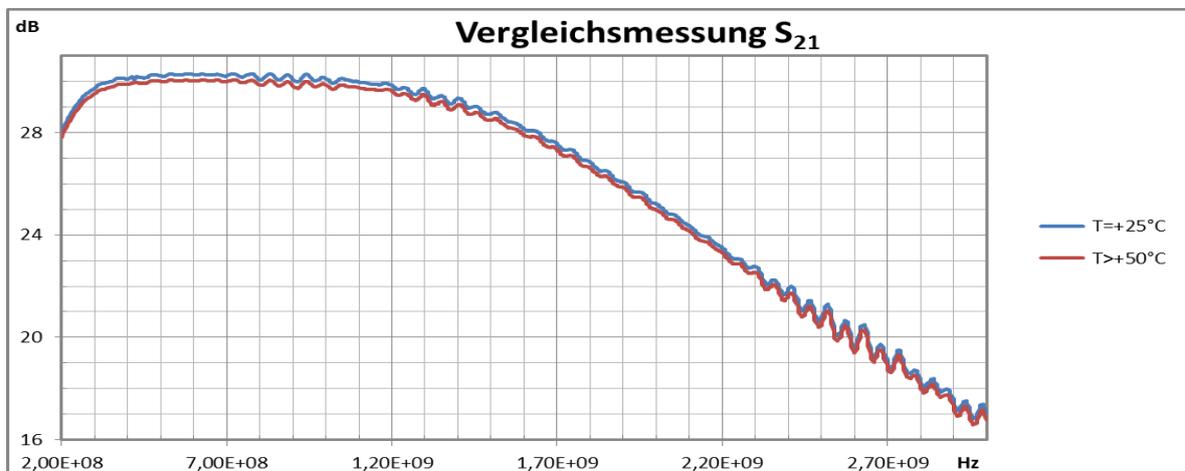


Abbildung 28: Messergebnisse bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

Wie sich erkennen lässt, resultierte aus einer Abweichung der Umgebungstemperatur von $>25^{\circ}\text{C}$ bereits eine Messabweichung von ungefähr 0,25 dB. Die Differenzen der beiden Linien lassen sich durch den Temperatureinfluss begründen. Durch diesen werden die Halbleiterelemente des VNA, sowie die Stabilität der Oszillatoren, beeinflusst. Außerdem tritt durch den Temperaturanstieg eine mechanische Änderung der Leiterbahn auf. Der Einfluss der Temperatur auf die verschiedenen Komponenten, hat wiederum Auswirkungen auf die Genauigkeit, mit der die Messwerte erfasst werden. Da beide Kennlinien relativ synchron verlaufen, kann man erkennen, dass die Temperaturdifferenz bei den beiden Messungen Einfluss auf das Gerät hat.

Viel wesentlicher ist die Temperaturregelung für die fehlerfreie Funktionsweise, da bei dieser Messreihe ohne Kühlung vereinzelt keine Aufnahme der Messwerte möglich war. Besonders bei längeren automatisierten Messungen ist dies noch problematischer, da Messwerte erst wieder nach einem Neustart, und einer dazugehörigen Abkühlung, erfasst werden konnten.

5.4 Messung mit Temperaturregelung und Verwendung eines Kalibrierungskits

5.4.1 Messung der Verstärkung S_{21}

Um den Messplatz verifizieren zu können, wurden, wie in Kapitel 5.1.2 erläutert, die identischen Temperaturen wie im Datenblatt des Herstellers verwendet. Da der Klimaschrank nur eine Temperaturregelung von ca. -40°C ermöglicht, wurde dieser Wert gewählt. In den nachfolgenden Abbildungen sind die verschiedenen Kennlinien der Messergebnisse sowie die des Herstellers dargestellt:

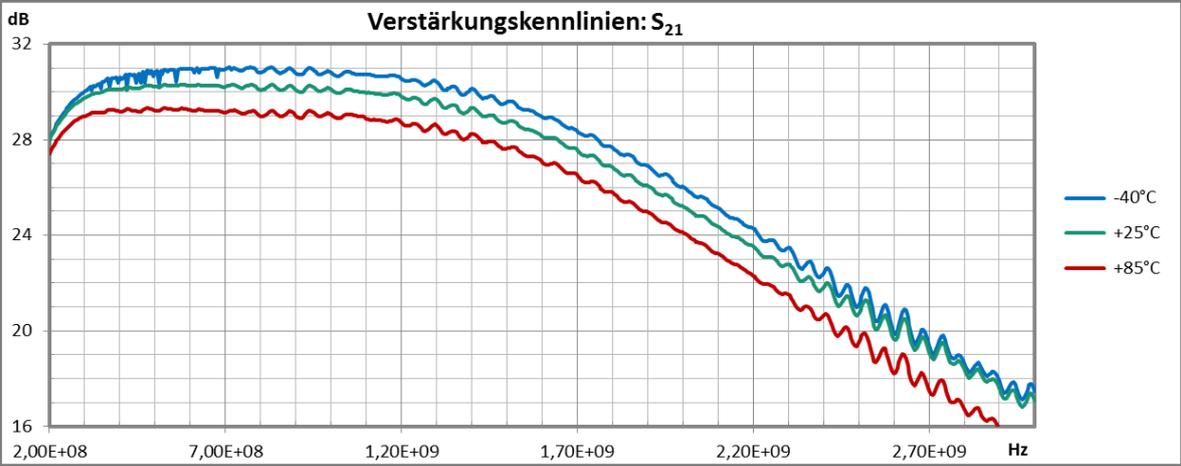


Abbildung 29: Verstärkungslinien

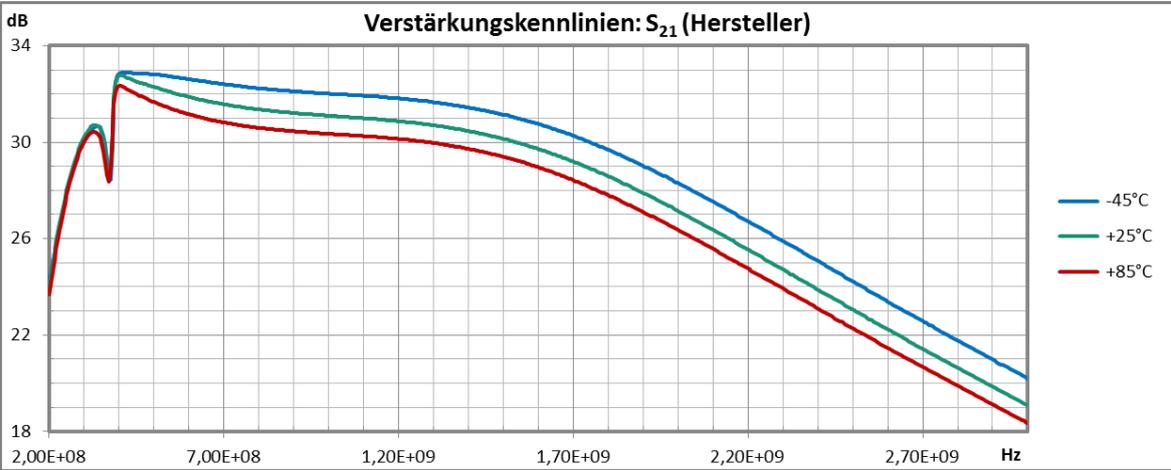


Abbildung 30: S_{21} -Kennlinien des Herstellers

In der erstellten Messung beträgt die Verstärkung bei 0,4 GHz 30,1 dB und bei 2,2 GHz 23,5 dB. Diese Werte sind ähnlich zu den Angaben des Herstellers, der für diesen Frequenzbereich 32,9 dB und 26,1 dB angibt. Die Differenzen zwischen den gemessenen Kennwerten und denen des Herstellers haben verschiedene Ursachen. Einen großen Einfluss haben die Konnektoren, die nicht zur vorhergegangenen Kalibrierung hinzugefügt werden konnten, wodurch ihre Dämpfungswerte die Kennlinie beeinflussen. Außerdem treten auf der Platine sowie am Verstärker Verluste auf, die diese Messwerte ebenfalls verfälschen. Wie bereits im Kapitel 5.2 erwähnt, weicht der Messaufbau von dem des Herstellers ab, was wiederum auch Auswirkungen auf die Messergebnisse hat. Als letzter Punkt ist aufzuführen, dass das Adapterstück das zur Kalibrierung verwendet wurde, nicht bei weiteren Messungen verwendet wurde. Dies hat auch einen Einfluss auf die Messergebnisse, kann aber vernachlässigt werden, da der Einfluss verhältnismäßig gering ist.

Zu den Kennwerten des Verstärkers im Arbeitsbereich ist außerdem die Temperaturabhängigkeit ersichtlich, und kann nicht vernachlässigt werden. Bei einem Vergleich der Kennlinien von -40°C und 85°C ist über den Arbeitsbereich eine Differenz der Verstärkung von bis zu 2 dB ersichtlich. Diese Differenz ist bei beiden Abbildungen nahezu identisch. Ausschlaggebend für diese Unterschiede ist der Temperatureinfluss auf den Kollektorstrom, wodurch sich der Arbeitspunkt verschiebt.

In der Abbildung des Herstellers ist bei 375 MHz ein Einbruch der Kennlinie zu erkennen, der in der eigenen Messung nicht auftritt. Dies resultiert daraus, dass auf der verwendeten Platine Kondensatoren verwendet wurden, die eine größere Kapazität besitzen, als vom Hersteller angegeben. Außerdem lässt durch die Bezeichnung „Typical Performance Curves“ im Datenblatt des Herstellers darauf schließen, dass bei der Erfassung der Messwerte, die „Smoothing-Funktion“ verwendet wurde. Bei dieser handelt es sich um die Anwendung eines Glättungsfilters, der die Messwerte an die optisch wahrgenommene Kennlinie angleicht. Um die Kennlinie nicht zu verfälschen, wurde diese Funktion bei den erfassten Messungen mittels VNA nicht verwendet.

Eine weitere Unregelmäßigkeit sind die Schwankungen der Kennlinien über den Arbeitsbereich, die bei allen Temperaturkennlinien in der Abbildung 29 auftreten. Diese Inlineritäten können verschiedene Ursachen haben. Einmal kann ihr Ursprung in ungewollten Verkopplungen innerhalb des Transistors liegen, wodurch der Verstärker schwingt (siehe Kapitel 2.1.5). Eine weitere Ursache ist in den Konnektoren begründet. Da diese in der Kalibrierung nicht berücksichtigt wurden, können an den Übergangsstellen, vom Kabel zum Konnektor und vom Konnektor zur Platine, Reflexionen auftreten. Um die Ursache genau deklarieren zu können, kann eine Zeitbereichsreflektometrie (TDR) durchgeführt werden. Bei dieser werden die Messergebnisse durch die inverse Fourier-Transformation in den Zeitbereich übertragen. Verschiedene Fehlanpassungen können dann verschiedenen Zeitpunkten zugeordnet werden, und darüber die Entfernung bis zur Stelle der Fehlanpassung berechnet werden. Hierfür sind allerdings Informationen über die verwendeten Materialien notwendig. Mit dem verwendeten VNA konnte die TDR nicht durchgeführt werden, da die Option (softwarebedingt) nicht im Funktionsumfang enthalten ist. Deshalb kann auch keine genaue Aussage über die Ursache getroffen werden.

In Hinsicht zu der Messkurve des Herstellers, treten diese Schwingungen nicht so aussagekräftig auf. Da dieser für die Konnektoren eine Kalibrierung durchgeführt hat, ist ein hervorrufen der Inleniaritäten durch die Konnektoren wahrscheinlich. In Hinsicht auf Kapitel 5.2 wird diese Annahme unterstrichen, da bei der unkalibrierten Messung noch größerer Unregelmäßigkeiten auftraten, die durch Reflexionen hervorgerufen wurden.

Im Bereich über 2,2 GHz treten noch größere Schwingungen auf, sind aber vernachlässigbar, da sie außerhalb des Arbeitsbereichs liegen.

5.4.2 Messung der Einfügedämpfung S_{11}

Als weitere elementare Größe wurde die Einfügedämpfung erfasst. Wie bereits im Kapitel Streuparameter erläutert, gibt diese Aufschluss darüber, wieviel Leistung am Eingang des DUT reflektiert wird.

Nachfolgend folgt die Gegenüberstellung der erfassten Messwerte mit den Kennlinien des Herstellers.

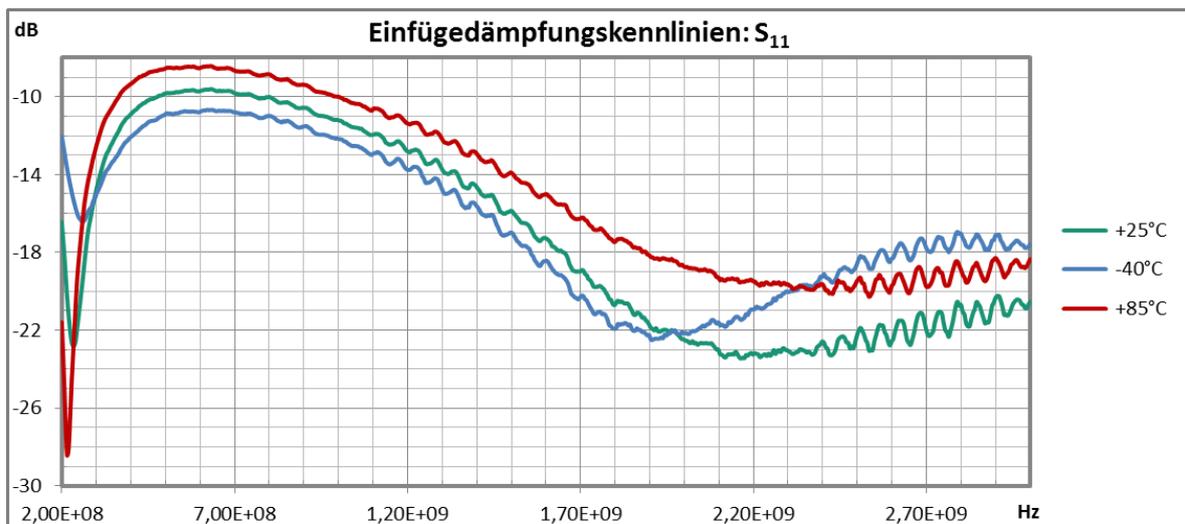


Abbildung 31: Einfügedämpfungskennlinien

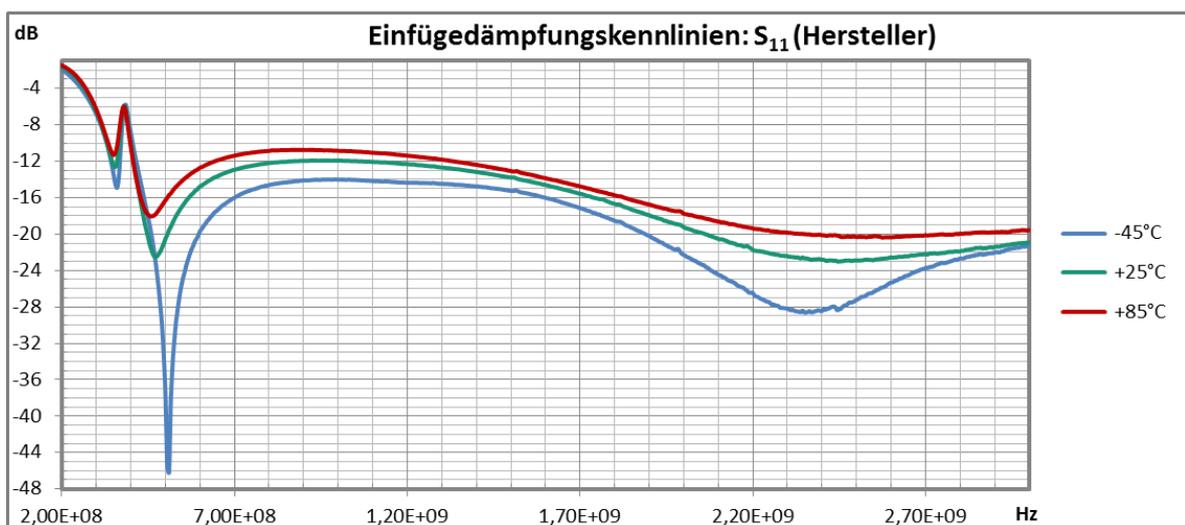


Abbildung 32: S_{11} -Kennlinien des Herstellers

Auch hier ist ein ähnlicher Verlauf zu den Kennlinien des Herstellers zu erkennen. Bei den erfassten Kennlinien ergibt sich eine maximale Einfügedämpfung von -8,4 dB bei 85°C, bzw. -9,6 dB bei -40°C. Des Weiteren ergeben sich über den Großteil des Arbeitsbereichs Messwerte unterhalb von -10 dB, was wiederum einer reflektierten Leistung von unter 10% am Eingang entspricht. Das spricht dafür, dass eine zufriedenstellende Anpassung vorliegt.

Die Unterschiede zu den Kennlinien des Herstellers resultieren auch hier aus verschiedenen Ursachen. Einerseits wurden weder die Konnektoren noch die Platine in der Kalibrierung berücksichtigt. Außerdem haben die unterschiedlichen Temperaturen Einfluss auf die Anpassung der Platine, die durch Spulen und Induktivitäten realisiert wird. Durch eine Änderung der Temperatur ändert sich beispielsweise die Kapazität eines Kondensators, wobei die Ausprägung vom verwendeten Dielektrikum im Kondensator abhängig ist. Ebenso werden auch die Eigenschaften des Dielektrikums in den Konnektoren verändert. Da weder bei den Kondensatoren noch bei den Konnektoren Informationen über das verwendete Dielektrikum vorliegen, kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, ob eine positive oder negative Beeinflussung der Anpassung zu erwarten ist.

Ebenso unterliegen die Leiterbahnen einem Temperatureinfluss. Die Auswirkungen sind wiederum von der Breite und der Dicke sowie vom verwendeten Material abhängig. Ein Unterschied in den Messwerten zu den Werten des Herstellers kann auch durch Unterscheidungen der Leiterbahnen und Platine begründet werden.

Als markantes Merkmal ist abermals die Inlinearität der Kennlinie zu nennen. Wie in der vorhergegangenen Messreihe, liegt die Ursache in Fehlanpassungen, die durch die Konnektoren hervorgerufen werden. Dies ist aber auch im Arbeitsbereich, aufgrund der niedrigen Schwankungen, zu vernachlässigen.

5.4.3 Messung der Rückflussdämpfung S_{22}

Um eine zufriedenstellende Anpassung im Zusammenschluss aller Komponenten zu gewährleisten, ist die Rückflussdämpfung eine weitere relevante Größe. Zur Verifizierung des Messplatzes wurde diese ebenfalls bei mehreren Temperaturen erfasst. Zum Abgleich der Kennlinien sind abermals die erfassten Werte denen des Herstellers in den nachfolgenden Graphen gegenübergestellt:

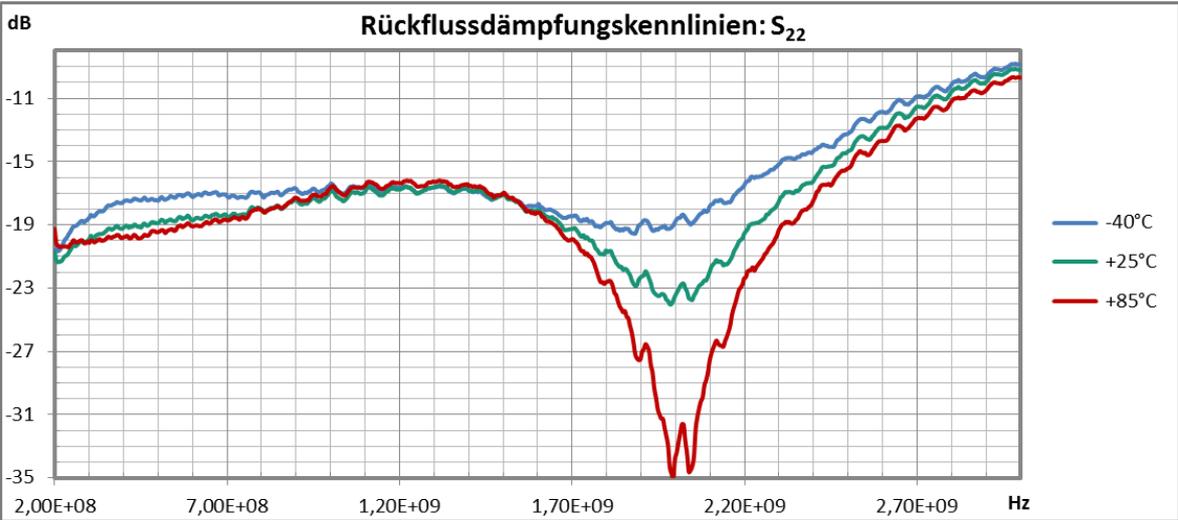


Abbildung 33: Rückflussdämpfungskennlinien

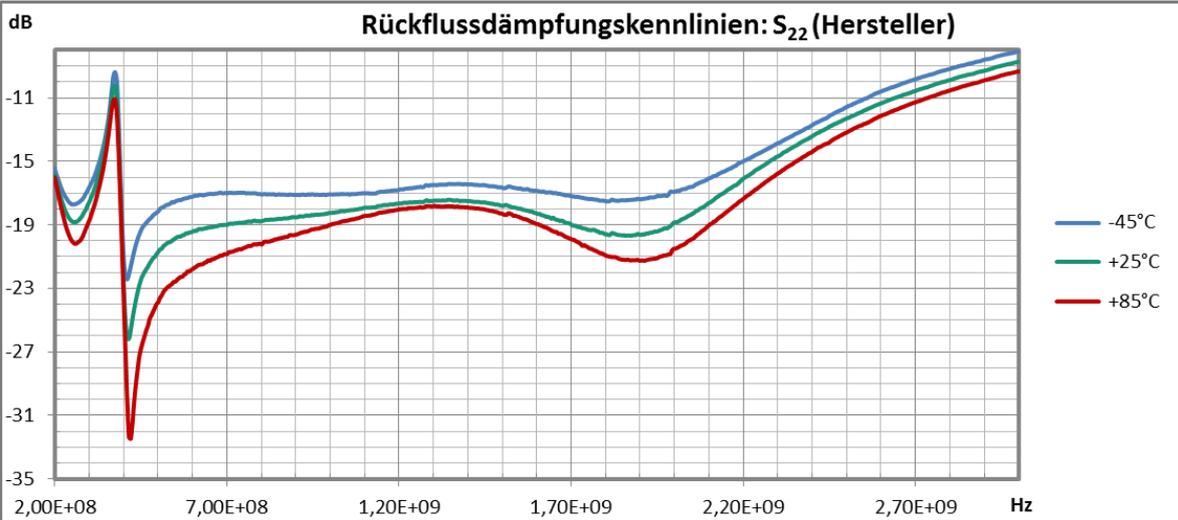


Abbildung 34: S_{22} -Kennlinien des Herstellers

Auch in diesem Vergleich ist wieder ein ähnliches Verhalten der Kennlinien zu erkennen. In Bezug auf den Arbeitsbereich von 0,4 bis 2,2 GHz weisen die Kennlinien sehr ähnliche Verläufe auf, die bei allen Temperaturen einen Maximalwert von -16 dB erreichen. Das entspricht wiederum einer Leistungsreflexion von ca. 2,5%. Im Vergleich zu den Kennlinien des Herstellers wurde außerdem im Bereich von 2 GHz eine höhere Anpassung erzielt, die mit ansteigender Temperatur noch ausgeprägter ausfiel.

Wie bereits bei der Einfügedämpfung, sind hier die gleichen Ursachen für die Abweichungen verantwortlich. Ebenso sind die unterschiedlichen Bauteile bei der verwendeten, und der Platine des Herstellers, nicht vernachlässigbar. Abweichende Spulen, Widerstände oder Kondensatoren haben aufgrund ihrer Toleranzen und ihrer verwendeten Materialien (z.B Dielektrikum) Einflüsse auf die Messergebnisse. Wie auch bereits bei der Einfügedämpfung, kann auch hier keine bestimmte Aussage getroffen werden, welche Ursache welchen Einfluss hat, da zu wenig Informationen, zu den verwendeten Bauteilen bei beiden Messreihen, vorliegen. Eher sind die Messabweichungen zu den Messwerten des Herstellers eine Kombination von all diesen Faktoren, die die Messung, wie in diesem Fall positiv, sowie auch negativ beeinflussen können.

6. Zusammenfassung und Ausblick

An das Thema der Abschlussarbeit wurden mehrere Anforderungen gestellt. In erster Linie waren für die Teilgebiete Aufbau, sowie Software ein modularer Aufbau und eine großes Spektrum an Messmöglichkeiten relevant. Außerdem sollte zur Verifizierung des Messplatzes ein Bauteil auf Umwelteinflüsse untersucht werden, um eine ordnungsgemäße Funktionalität zu gewährleisten. An das Messobjekt wurde als Anforderung gestellt, dass es sich um ein aktives Zweitor handelt.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf die Umsetzung der einzelnen Anforderungen eingegangen, ein Fazit des Ergebnisses gegeben und ein Ausblick für Optimierungen und zukünftige Arbeiten gegeben.

6.1.1 Realisierter Messplatz

In der Abbildung 35 ist der finale Messplatz dargestellt:



Abbildung 35: vollständiger Messplatz

Durch mehrere Aspekte konnte ein umfangreicher, modularer wie auch funktioneller Messplatz realisiert werden, die nachfolgend erläutert werden.

Durch die Vielzahl an verschiedenen Messgeräten war es möglich ein breites Spektrum an verschiedenen Messmöglichkeiten zu bieten. Die Anzahl an Messgeräten wurde nur durch die Höhe des Racks limitiert. Da dieser auch für Messungen ohne Umwelteinflüsse verwendet werden kann/soll, musste die maximale Höhe kleiner als die der Türrahmen sein. Durch eine optimale Anordnung der Messgeräte, konnten noch freie Ressourcen für zukünftige Erweiterungen des Messplatzes, bspw. Durch ein Oszilloskop, geschaffen werden.

Durch Messgeräte wie dem VNA, Synthesizer oder Spektrumanalysator wird der Frequenzbereich, in dem gemessen werden kann, auf 40 GHz begrenzt. Durch die Unterbringung der Geräte in einem Rack ergab sich in dieser Hinsicht ein weiterer Vorteil. Alle Geräte können mit einem geringen Aufwand durch andere Geräte ausgetauscht werden, wodurch sich eine erweiterte Funktionalität, eine höhere Messbandbreite und/oder eine verbesserte Messgenauigkeit erreichen lässt.

Durch Hinzufügen der Übergangsstücke an der Seitenwand des Racks wurden weitere Vorteile erreicht. Da diese innerhalb des Racks mit den einzelnen Geräten verbunden sind, muss keine Änderung der Verkabelung für verschiedene Messungen durchgeführt werden. Daraus resultiert außerdem, dass für die Vermessung eines Zweitorts nicht für jedes Gerät ein hitzebeständiges Messkabel erworben werden musste (Kostensparnis). Ferner müssen nur die zwei hitzebeständigen Kabel an das Wandverbindungsstück des jeweiligen Geräts angeschlossen werden. Sollten durch spätere aufbauende Arbeiten auch Mehrttore vermessen werden, ist in erster Linie nur eine entsprechende Anzahl an hitzebeständigen Messkabeln erforderlich.

6.1.2 Softwarerealisierung

Für die Realisierung eines funktionellen sowie modularen Softwarekonzepts wurde die Programmierumgebung Labview gewählt. Diese hat nicht nur den Vorteil, dass sich mit einem Großteil der Geräte eine unkomplizierte Kommunikation realisieren lässt, sondern das auch das Erstellen einer übersichtlichen und intuitiven GUI möglich ist. Dieser Sachverhalt konnte in der Abschlussarbeit bei der Erstellung der verschiedenen Gerätetreiber nochmals verdeutlicht werden.

Für den Aspekt des Hardwareaufbaus war die Modularität ein wichtiges Kriterium. Damit die Geräte mit einem möglichst geringen Aufwand ersetzt oder erweitert werden können, ist ein modularer Softwareaufbau im gleichen Maß von Bedeutung. Um auch die Software modular zu gestalten, wurde ein Konzept erstellt, in dessen Form alle Gerätetreiber realisiert werden müssen. Dieses gliedert sich in vier verschiedene Cases (Init, Set, Get, End). Sollte der Messplatz erweitert oder geändert werden, muss dieses Treiberkonzept für neue Treiber beibehalten werden. Dadurch können diese Treiber zum Gateway hinzugefügt werden. Im eigentlichen Programm („Manuell“ oder „Automatik“) müssen durch den modularen Aufbau nur noch marginale Änderungen an den Ein- und Ausgabeelementen vorgenommen werden.

Eine ebenso essentielle Anforderung an die Software war die Stabilität der Treiber. Insbesondere für Messungen mit einer Dauer von mehreren Stunden ist dies von Relevanz. In verschiedenen Messungen innerhalb der Projektgruppe konnte diese, sowohl bei Kurz- als auch bei Langzeitmessungen, nachgewiesen werden.

In Anbetracht der Software können aber auch hier aufbauende Arbeiten realisiert werden. Im Zeitraum der Abschlussarbeit konnte nicht der volle Funktionsumfang für alle Geräte realisiert werden, sondern nur die Funktionen, die nach eigenem Ermessen und nach Rücksprache mit Mitarbeitern des MHS, relevant waren. Da die Treiber innerhalb des Gateways ausgeführt werden, müssen neue Funktionen nur im entsprechenden Treiber-VI implementiert werden.

6.1.3 Ergebnisse der Verifizierung

Um einen zuverlässigen Messplatz, besonders in Bezug auf das Zusammenspiel von Hard- und Software, zu gewährleisten, wurden verschiedene Messungen zur Verifizierung durchgeführt. Hierfür wurde ein Verstärker ausgewählt, der im Frequenzbereich von 0,2 bis 2,2 GHz eingesetzt werden kann. Zur Verifizierung wurden verschiedene Messungen durchgeführt, die für die Charakterisierung von Verstärkern relevant sind. Der Umfang der Messungen wurde nur durch den Funktionsumfang des Netzwerkanalysators begrenzt, mit dem beispielsweise hardwarebedingt keine Bestimmung des Kompressionspunktes möglich war. Außerdem war softwarebedingt keine TDR-Messung möglich, mit der eine Bestimmung von Reflexionspunkten auf der Übertragungsstrecke möglich gewesen wäre. Diese Funktion kann aber möglicherweise softwareseitig hinzugefügt werden. Hier wäre eine Rücksprache mit dem Hersteller notwendig.

Bei der Vermessung des Verstärkers wurde die Verstärkung und die Einfüge- sowie Rückflusdämpfung erfasst. Durch den Vergleich der einzelnen Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen wurden Unterschiede ersichtlich. Diese liegen im Verhalten der Bauteile bei verschiedenen Temperaturen begründet.

Bei allen Messreihen konnten sehr ähnliche Messwerte erzielt werden, was ein zufriedenstellendes Messergebnis darstellt. Zur Verdeutlichung sind in der nachfolgenden Abbildung die Trendlinien der S_{21} -Messung vom Hersteller und der eigenen Messung bei 25°C gegenübergestellt:

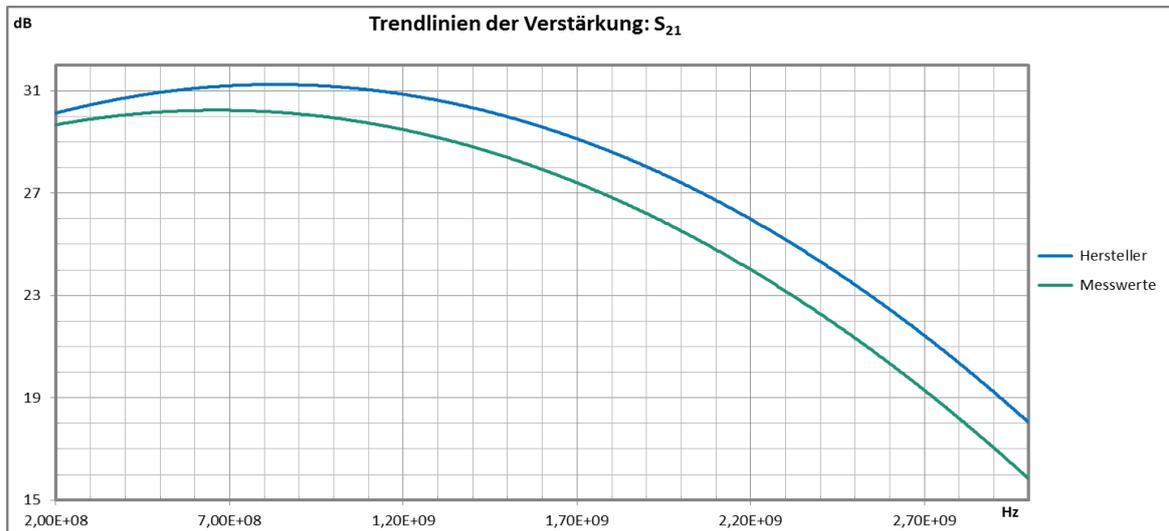


Abbildung 36: Trendlinie der Verstärkung im Vergleich

Die Unterschiede der Kennlinien liegen in Unzulänglichkeiten der Kalibrierung begründet. Unter anderem konnten die Konnektoren der Platine nicht bei der Kalibrierung der Messstrecke berücksichtigt werden.

Trotz dieses Umstandes konnten bei allen Messreihen unter verschiedenen Temperaturen zufriedenstellende Messwerte erzielt werden, die sich auch mit den Angaben des Herstellers in ihrem Verlauf decken. Diese waren sowohl bei Kurz- als auch bei Langzeitmessungen stabil und reproduzierbar.

Unregelmäßigkeiten durch Reflexionen waren in ihrer Amplitude verhältnismäßig klein, und konnten vernachlässigt werden.

VIII. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungstabelle.....	IV
Tabelle 2: Physikalische Konstanten und Symbole.....	V
Tabelle 3: Größenpräfixe und Beschreibung.....	V
Tabelle 4: Umrechnung Leistungspegel.....	V
Tabelle 5: Dauerbetriebstemperaturbereich.....	3

IX. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kennlinien eines Transistors bei verschiedenen Temperaturen	2
Abbildung 2: Fraunhofer FHR Standort Wachtberg	4
Abbildung 3: Darstellung einer ebenen Welle	8
Abbildung 4: elektromagnetische Spektrum	9
Abbildung 5: Addition eines Signals mit Rauschen	12
Abbildung 6: Ersatzschaltbild einer Leitung	13
Abbildung 7: Darstellung einer Fehlanpassung	13
Abbildung 8: Beispielhafte Veranschaulichung einer Signalverstärkung	15
Abbildung 9: Signal mit Rauschleistung und Eigenrauschen des Verstärkers	16
Abbildung 10: 1-dB-Kompressionspunkt	19
Abbildung 11: Intermodulationsprodukte im Spektrum	20
Abbildung 12: Bestimmung des Intermodulationspunktes dritter Ordnung ¹⁷	21
Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines VNA	25
Abbildung 14: Zweitor mit hin- und rücklaufender Welle	26
Abbildung 15: Anritsu SM6441	31
Abbildung 16: Gehäuse mit VNA und Synthesizer	32
Abbildung 17: Kombination der einzelnen Geräte	36
Abbildung 18: Rackseitenwand mit Übergängen	37
Abbildung 19: Rackaufbau	38
Abbildung 20: Hierarchie der Programmkomponenten	40
Abbildung 21: Treiber-VI des Klimaschranks aufgeteilt in seine Unter-VI's	41
Abbildung 22: Gateway-VI mit Auswahlstring	42
Abbildung 23: Blockdiagramm Gateway	43
Abbildung 24: Verstärker PMA-545G1+	46
Abbildung 25: Blockschaltbild des Messaufbaus	49
Abbildung 26: Vergleichsmessung ohne Kalibrierung	49
Abbildung 27: Vergleichsmessergebnis	50
Abbildung 28: Messergebnisse bei verschiedenen Umgebungstemperaturen	53
Abbildung 29: Verstärkungslinien	54
Abbildung 30: S_{21} -Kennlinien des Herstellers	54
Abbildung 31: Einfügedämpfungskennlinien	57
Abbildung 32: S_{11} -Kennlinien des Herstellers	57
Abbildung 33: Rückflussdämpfungskennlinien	59
Abbildung 34: S_{22} -Kennlinien des Herstellers	59
Abbildung 35: vollständiger Messplatz	61
Abbildung 36: Trendlinie der Verstärkung im Vergleich	65

Quellenverzeichnis

- [1] <http://www.ne555.at/2014/index.php/elektronik-grundlagen/analogtechnik/281-transistor-kennlinienfelder?showtemp-weball=1> [Stand: 09.02.2015]
- [2] http://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturbereiche_von_Elektronikbauelementen [Stand: 18.12.2014]
- [3] http://www.radarsummerschool.fraunhofer.de/summerschool/index.php?option=com_content&view=article&id=58:organiser-host&catid=34:allgemein&Itemid=65 [Stand: 09.02.2015]
- [4] http://www.fhr.fraunhofer.de/de/das_institut.html [Stand: 18.12.2014]
- [5] http://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer-Institut_f%C3%BCr_Hochfrequenzphysik_und_Radartechnik [Stand: 18.12.2014]
- [6] <http://wiki.fhr.fraunhofer.de/wiki/index.php/MHS> [Stand: 18.12.2014]
- [7] <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/emwellen/ausbreitung.vlu.html> [Stand: 10.01.2015]
- [8] <http://www.teialehrbuch.de/Kostenlose-Kurse/Markup-Sprachen/16367-Elektromagnetische-Wellen-und-Licht.html> [Stand: 04.02.2015]
- [9] <http://electronics-for-beginners.com/pages/page/1080/> [Stand: 03.03.2015]
- [10] <http://home.arcor.de/wetec/rechner/czltng.htm> [Stand: 12.01.2014]
- [11] <http://www.radartutorial.eu/druck/Leitungstechnik.pdf> [Stand: 11.02.2015]
- [12] <http://www.uni-stuttgart.de/int/forschung/PA/Grundlagen/PA-Kenngroessen/Linearitaet.html> [Stand: 09.03.2015]
- [13] http://www.mpg.de/1215868/Laser_Teilchenstrahlen [Stand: 03.03.2015]
- [14] Werner, Martin; (2006, 1. Auflage): Nachrichtenübertragungstechnik, Vieweg Verlag
- [15] Lange, Klaus; Meinke, H.H.; Gundlach, F.W.; Löcherer, Karl-Heinz; (1992, 5. Auflage): Taschenbuch der Hochfrequenztechnik – Band 1: Grundlagen, Springer Verlag
- [16] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kompressionspunkt> [Stand: 10.03.2015]
- [17] Hiebel, Michael; (2007, 2. Auflage): Grundlagen der vektoriellen Netzwerkanalyse, Rohde und Schwarz
- [18] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kompressionspunkt> :[Stand: 08.01.2015]
- [19] Lange, Klaus; Meinke, H.H.; Gundlach, F.W.; Löcherer, Karl-Heinz; (1992, 5. Auflage): Taschenbuch der Hochfrequenztechnik – Band 1: Grundlagen, Springer Verlag
- [20] http://www.amateurfunk-wiki.de/index.php/Netzwerkanalysator#Vor-_und_Nachteile_2 [Stand: 03.03.2015]
- [21] Thumm, Manfred; Wiesbeck, Werner; Kern, Stefan; (1998, 2. Auflage): Hochfrequenzmesstechnik, Vieweg und Teubner Verlag
- [22] Heuermann, Holger; (2009, 2. Auflage): Hochfrequenztechnik, Vieweg und Teubner Verlag
- [23] Zimmer, Gernot; (2000, 1. Auflage): Hochfrequenztechnik - Lineare Modelle, Springer Verlag
- [24] <http://siart.de/lehre/nwa.pdf> [Stand: 12.02.2015]
- [25] <http://de.wikipedia.org/wiki/LabVIEW> [Stand: 17.01.2015]
- [26] http://www.temp-web.de/cms/front_content.php?idcat=147 [Stand: 21.01.2015]
- [27] Nolden, Volker; (2015): Entwicklung eines Hochfrequenzmessplatz zur Verifikation von Umwelteinflüssen auf die elektrischen Parameter von Baugruppen und Bauelementen
- [28] Münch, Steffen; (2015): Entwicklung eines softwaregesteuerten, modular konfigurierbaren Messplatzes zur Charakterisierung der Hochfrequenzeigenschaften von Baugruppen bei frei parametrierbaren Temperaturverläufen

X. Anlagenverzeichnis

Die folgenden Dateien sind auf der beigefügten CD vorhanden:

- Bachelorarbeit
- Labviewcode der einzelnen Gerätetreiber
- Labviewcode des Gateways
- Labviewcode des Manuellprogramms (Keine Eigenleistung, nur als Beispiel für den Einsatz des Gateways)
- Messergebnisse der einzelnen Messreihen mit dazugehörigen Diagramm
- Verschiedene Datenblätter

XI. Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift des Verfassers

Danksagung

Abschließend möchte ich noch all jenen Danken, die durch ihre fachliche oder auch persönliche Unterstützung zu dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt vor allem meiner Familie. Diese konnte mir durch Vertrauen in meine Leistungen und aufbauende sowie unterstützende Worte stets Kraft während des Studiums und der Zeit der Abschlussarbeit geben. Ebenfalls sind im gleichen Atemzug alle Freunde zu nennen, die mir auch in schwierigen Zeiten immer mit aufbauenden Worten und Rat und Tat zur Seite standen.

Auch auf diesem Wege nochmals Danke an Christiane Brodrück, für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Ein großes Dankeschön natürlich auch an Dr. Sebastian Hantscher, der die Abschlussarbeit beim Fraunhofer FHR erst ermöglichte und bei der Erstellung wertvolle Hinweise geben konnte.

In Bezug auf die Zeit beim FHR ist als erstes noch ein Danke an Herr Dirk Nüßler zu nennen, der in Bezug auf die Praktikums- und Bachelorarbeitsphase in einigen Momenten mit hilfreichen Ratschlägen zur Seite stand.

Natürlich möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern des FHR bedanken, die jederzeit ein offenes Ohr für einen hatten. Besonders möchte ich hier Matthias Demming, Rüdiger Zimmermann, Sven Leuchs, Paul Warok und Gunnar Briese danken. In diesem Zusammenhang auch vielen Dank an Steffen Münch und Volker Nolden, mit denen die Zusammenarbeit in der Projektgruppe eine mehr als angenehme und unterhaltsame Zeit war.