



Universität Stuttgart



Institut für
Robuste
Leistungshalbleitersysteme

Fachpraktikum (Bachelor)

6G HARDWARELABOR - DESIGN UND IMPLEMENTIERUNG EINES HF TRANSCEIVERS

Versuch 2: Auslegung eines HF-Verstärkers

Protokollführer

Lukas Müller

Erik Zimmermann

Farhad Valizada

Betreuer

Simon Haussmann

Eingereicht

am 20.05.2025

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
1.1 Ziel des Versuchs	4
1.2 Relevanz und Anwendungsbereiche von HF-Verstärkern	4
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Funktion eines HF-Verstärkers	5
2.2 Arbeitspunkteinstellung	6
2.2.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes	7
2.2.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers	7
2.3 Bedeutung der S-Parameter	8
2.3.1 Smith-Diagramm	9
2.4 Koppelkondensator	9
3 Hochfrequenz-Simulation	10
3.1 Inbetriebnahme von Keysight Advanced Design System (ADS)	10
3.1.1 Installation von ADS	10
3.1.2 Erstellen eines neuen Projekts	10
3.1.3 Vertrautmachen mit der Benutzeroberfläche	11
3.2 Analyse des Datenblattes zum Transistor BFR181W	11
3.3 DC-Simulation	11
3.3.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes	12
3.3.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers	12
3.4 S-Parameter-Simulation	13
3.4.1 Input- und Output Anpassung	14
4 Technische Umsetzung	16
4.1 Platinaufbau	16
4.2 Bestückung der PCB	17
4.3 DC-Pegel verifizieren	18
4.4 SOLT-Kalibrierung	19
4.4.1 Verifizierung der Qualität der SOLT-Kalibrierung	20
4.4.2 Messen der S-Parameter	20
4.5 Vergleich zur Simulation	21
5 Fazit	22

Abkürzungsverzeichnis

ADS	Advanced Design System
HF	Hochfrequenz
6G	Sixth Generation
SMA	SubMiniature version A
PCB	Printed Circuit Board

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist es, einen HF-Verstärker zu simulieren und dessen Eigenschaften zu analysieren. Dabei wird ein BJT-Transistor verwendet, um die Verstärkung des Signals zu erhöhen. Der Versuch umfasst die Analyse der Eigenschaften des vorliegenden Transistors der Reihe BFR181W, die Berechnung der Widerstände zur Anpassung des Arbeitspunkts, um eine optimale Verstärkung zu erzielen, sowie die Durchführung einer S-Parameter-Simulation zur Überprüfung der Verstärkung und Stabilität des Verstärkers.

1.2 Relevanz und Anwendungsbereiche von HF-Verstärkern

Ein HF-Verstärker ist ein elektronisches Gerät, das Hochfrequenzsignale verstärkt. Diese Signale liegen typischerweise im Frequenzbereich von 3 kHz bis 300 GHz und finden Anwendung in verschiedenen Bereichen, wie der Kommunikationstechnik, Radartechnologie, Satellitenkommunikation sowie in der Medizintechnik. HF-Verstärker sind entscheidend für die Signalübertragung und -verarbeitung in modernen Kommunikationssystemen. Sie werden eingesetzt, um schwache Signale zu verstärken, die von Antennen empfangen werden, und um sicherzustellen, dass die Signale über große Entfernungen übertragen werden können.

In unserem Versuch ist es von großer Bedeutung, die Eigenschaften des BJT-Transistors zu analysieren und die Widerstände so zu dimensionieren, dass ein stabiler Arbeitspunkt erreicht wird, damit bei späteren Versuchen eine Übertragung einer Bilddatei bei einer Frequenz von 1,25 GHz möglich ist.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Funktion eines HF-Verstärkers

Ein Verstärker ist ein elektronisches Gerät mit mindestens einem aktiven Bauelement, wie zum Beispiel einem Transistor. Das Ziel eines Verstärkers ist es, das Ausgangssignal größer als das Eingangssignal zu machen. Da hierbei dem Signal Leistung hinzugefügt wird, muss ein Verstärker eine eigene Energiequelle besitzen.

Besonders in der Hochfrequenztechnik (HF) spielt der Verstärker eine wichtige Rolle. Soll zum Beispiel mithilfe einer Antenne noch in weiter Entfernung ein Signal gemessen werden, muss dieses zuerst verstärkt werden.

Normalerweise werden im Hochfrequenzbereich Frequenzen von 10 kHz bis 100.000 MHz verstärkt.

2.2 Arbeitspunkteinstellung

Der Arbeitspunkt einer elektronischen Schaltung beschreibt den aktiven Bereich in dem ein Transistor arbeitet ,wenn kein Signal angelegt ist. Der Arbeitspunkt liegt im linearen Bereich des Kennlinienfeldes des Transistors, sodass eine verzerrungsfreie Signalverstärkung möglich ist.

- Wäre der Arbeitspunkt zu niedrig eingestellt, würde der Transistor in den Sperrbereich geraten und das Signal würde unten abgeschnitten werden.
- Wäre der Arbeitspunkt zu hoch eingestellt, würde der Transistor in den Sättigungsbereich geraten und das Signal würde oben abgeschnitten werden.
- Da der Transistor im linearen Bereich arbeitet, reagiert der Transistor proportional auf Änderungen der Basisspannung. Ebenso folgt der Kollektorstrom linear der Basissteuerung. Das führt zu einer Verzerrungsfreien Verstärkung und effizienten Leistungsübertragung

Je nach Einstellung kann die Schaltung unterschiedlich auf das Eingangssignal reagieren. Häufig wird in der Emitterschaltung ein zusätzlicher Emitterwiderstand eingebaut, der zu einer Stromgegenkopplung führt. Dieser Widerstand sorgt dafür, dass der Arbeitspunkt stabil bleibt, auch wenn sich die Temperatur ändert. Da wir bei unserem Versuch mit konstanter Temperatur arbeiten, ist dieser nicht notwendig und wird vernachlässigt.

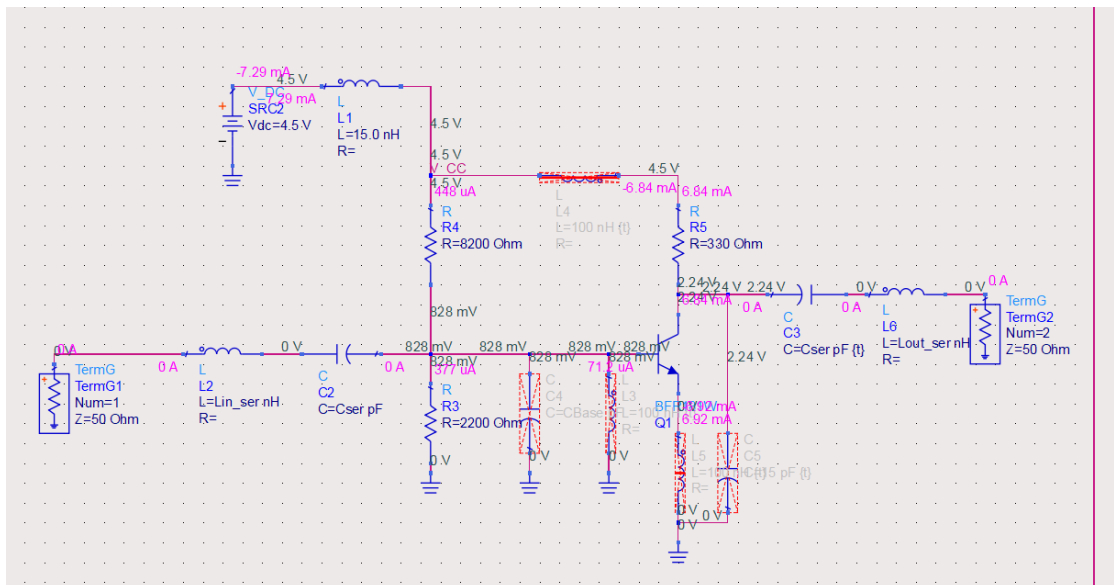


ABBILDUNG 2.1: Emitterschaltung

2.2.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes

Folgende Spannungswerte seien gegeben:

- $U_{CC} = 4.8 \text{ V}$
- $U_{BE} = 0.77 \text{ V}$

Der Kollektorstrom I_C wird auf 75 % des maximal zulässigen Kollektorstroms $I_{C,\max} = 20 \text{ mA}$ gesetzt. Der Widerstandswert R_5 wird mit folgender Formel berechnet:

$$R_5 = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C} = \frac{4.8 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 320 \Omega \quad (2.1)$$

Bei der Verwendung der E12-Reihe wird eine Faustregel angewendet, nach der man die Widerstandswerte auf die nächstgelegene E12-Reihe aufrundet. Somit beträgt der errechnete Widerstandswert von R_5 330Ω . Dadurch wird der in den Kollektor eingehende Strom begrenzt, was eine Überlastung des Transistors im Dauerbetrieb verhindert. Bei der Wahl eines niedrigeren Widerstandswertes würde der Kollektorstrom I_C den maximalen Kollektorstrom $I_{C,\max}$ überschreiten, was zu einer Überlastung des Transistors führen würde.

2.2.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers

Der Basisstrom berechnet sich zu:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (2.2)$$

Für einen typischen Verstärkungsfaktor $\beta = 100$ ergibt sich:

$$I_B = \frac{10 \text{ mA}}{100} = 0,1 \text{ mA} = 100 \mu\text{A} \quad (2.3)$$

Der Querstrom des Spannungsteilers I_Q sollte mindestens das 10-fache des Basisstroms betragen:

$$I_Q = 10 \cdot I_B = 1,0 \text{ mA} \quad (2.4)$$

Die Basisspannung U_B ergibt sich zu:

$$U_B = U_{BE} + U_E \approx 0,77 \text{ V} \quad (2.5)$$

Für die Betriebsspannung $U_{CC} = 4,8 \text{ V}$ ergeben sich die Widerstände R_4 (oben) und R_3 (unten):

$$R_3 = \frac{U_B}{I_Q} = \frac{0,77 \text{ V}}{1,0 \text{ mA}} = 0,77 \text{ k}\Omega \quad (2.6)$$

$$R_4 = \frac{U_{CC} - U_B}{I_Q} = \frac{4,8 \text{ V} - 0,77 \text{ V}}{1,0 \text{ mA}} = 4,03 \text{ k}\Omega \quad (2.7)$$

Nach der Berechnung ergibt sich für R_3 ein Wert von $0,77 \text{ k}\Omega$. In der praktischen Simulation mit ADS zeigte sich jedoch, dass mit diesem Wert ein negatives Gain bei der S-Parameter-Simulation auftritt. Daher wird R_3 nach der E12-Reihe auf $1,0 \text{ k}\Omega$ erhöht, um einen stabilen Arbeitspunkt und ein positives Verstärkungsverhalten zu gewährleisten.

Mit der E12-Reihe werden gewählt:

$$R_3 = 1,0 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 4,7 \text{ k}\Omega$$

Damit ist der Spannungsteiler dimensioniert, sodass sich der Arbeitspunkt im linearen Bereich des Transistors befindet.

2.3 Bedeutung der S-Parameter

S-Parameter bzw. Streuparameter werden genutzt, um die HF-Eigenschaften eines Netzwerks darzustellen. Sie werden benötigt, um zu verstehen, welche Anteile eines Signals reflektiert, durchgelassen oder zwischen den Ports eines Netzwerks übertragen werden. Sie werden komplex dargestellt, also mit Betrags- und Phasenkomponente.

Die Indexnummerierung folgt dem Energiefluss:

- Verläuft die Energie von Port 1 zu Port 1, heißt der S-Parameter S11.
- Verläuft die Energie von Port 2 zu Port 1, heißt der S-Parameter S21.

Somit können an einem Zweitor folgende S-Parameter auftreten:

- S11 ist der Eingangsreflexionsfaktor. Dieser Parameter gibt an, wie viel des Eingangssignals zurückreflektiert wird.
- S21 ist der Vorwärtstransmissionsfaktor. Dieser Parameter gibt die Effizienz der Signalübertragung vom Eingang zum Ausgang an.

- S_{12} ist der Rückwärtstransmissionsfaktor. Dieser Parameter gibt an, wie gut Port 1 von Signalen von Port 2 isoliert ist.
- S_{22} ist der Ausgangsreflexionsfaktor. Dieser Parameter gibt an, wie viel des Ausgangssignals zurückreflektiert wird.

2.3.1 Smith-Diagramm

Das Smith-Diagramm ermöglicht die grafische Darstellung der S-Parameter. Dafür werden der Real- und Imaginärteil des Reflexionsfaktors in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen und ermöglichen dadurch eine einfachere Impedanzanpassung.

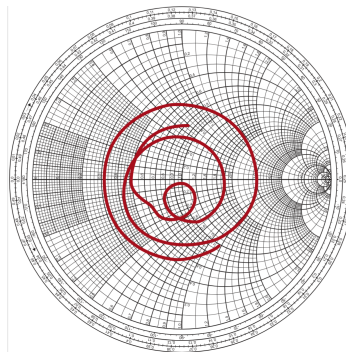


ABBILDUNG 2.2: Smith-Diagramm Beispiel

Quelle: https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/s-parameter-verstehen_257831.html#gallery-13

2.4 Koppelkondensator

Die seriellen Kapazitäten C_2 und C_3 bzw. Koppelkondensatoren in einer Emitterschaltung haben mehrere Aufgaben. Zum einen kompensieren sie Störungen, filtern den Gleichanteil aus der Wechselspannung heraus und dienen gleichzeitig als Hochpass.

Kapitel 3

Hochfrequenz-Simulation

In diesem Kapitel wird die Hochfrequenz ([HF](#))-Simulation des Transistors BFR181W durchgeführt sowie die Dimensionierung der Widerstände R_3 , R_4 und R_5 aus dem Kapitel 2: “Theoretische Grundlagen” überprüft und belegt.

3.1 Inbetriebnahme von Keysight Advanced Design System (ADS)

3.1.1 Installation von ADS

Die Software Advanced Design System ([ADS](#)) dient zur Simulation von Schaltungen unterschiedlichen Komplexitätsgrades. In diesem Versuch wird die Software verwendet, um eine Hochfrequenzschaltung zu simulieren und zu analysieren. Die Software bietet eine Vielzahl von Funktionen, darunter die Möglichkeit, Schaltungen zu entwerfen, S-Parameter zu simulieren und verschiedene Analysewerkzeuge zu nutzen.

3.1.2 Erstellen eines neuen Projekts

Die Software ist auf den Rechnern im ILH-Labor bereits installiert.

Nach dem Start der Software wird ein neues Projekt aus den bereits zur Verfügung stehenden Workspaces erstellt.

Diese sind auf der ILIAS-Seite des Praktikums im Dateiarchiv `TransmitterAmpDesign 2024.zip` hinterlegt.

Die Datei wird entpackt und in der Software geöffnet. Außerdem werden die benötigten Bibliotheken aus dem Dateiarchiv `Infineon-RFTransistor-Keysight ADS Design Kit-SM-v02 10-EN.zip` geladen. Diese stehen ebenfalls auf der ILIAS-Seite zur Verfügung.

3.1.3 Vertrautmachen mit der Benutzeroberfläche

Schließlich werden die Tutorials 1 und 2 von ADS durchgearbeitet, um sich mit der Benutzeroberfläche und den grundlegenden Funktionen der Software vertraut zu machen. Zu Beginn der Schaltungsanalyse wird das Schema TX_Amp_Bias.dds geöffnet. Dieses ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

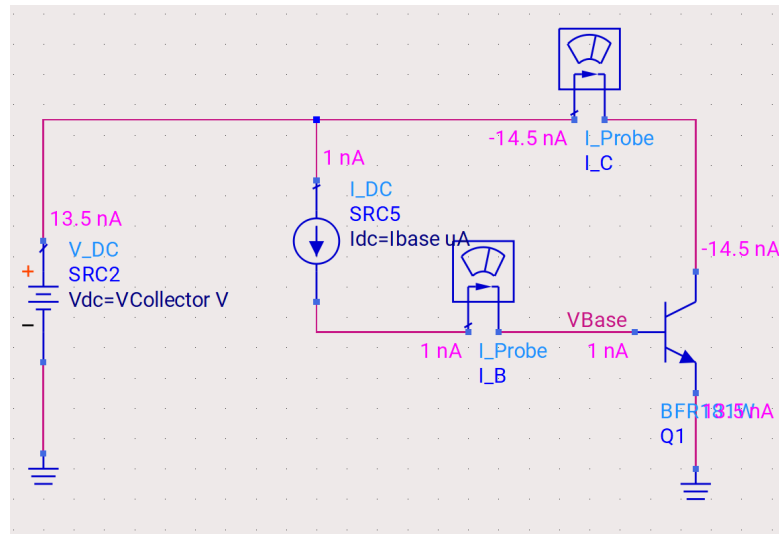


ABBILDUNG 3.1: Schaltbild der Schaltung TX_Amp_Bias.dds in ADS.

3.2 Analyse des Datenblattes zum Transistor BFR181W

Um die Schaltung zu simulieren, wird der Transistor BFR181W aus der verfügbaren Bibliothek verwendet. Die genauen Parameter des Transistors werden aus dem Datenblatt entnommen. Dieses steht ebenfalls auf der ILIAS-Seite des Praktikums zur Verfügung.

Die Tabelle “Maximum Ratings at $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified” unten links auf Seite 1 des Dokuments zeigt, dass der maximal zulässige Kollektorstrom $I_{C,\text{max}}$ 20 mA beträgt.

3.3 DC-Simulation

Im Folgenden wird eine DC-Simulation der später aufzubauenden Schaltung durchgeführt. Außerdem werden die Arbeitspunkte optimal durch die Anpassung der Widerstandswerte eingestellt. Die DC-Simulation wird in ADS durchgeführt, um die DC-Pegel der Schaltung zu überprüfen.

3.3.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes

Das errechnete Ergebnis aus dem Kapitel 2.2.1 lässt sich anhand der Simulation verifizieren.

Zuerst wird ein Sweep des Kollektorwiderstandes R_5 im Bereich von $100\,\Omega$ bis $4,7\,\text{k}\Omega$ durchgeführt. Es ergibt sich folgender Verlauf des Kollektorstroms I_C in Abhängigkeit des Kollektorwiderstandes R_5 :

Einstellung Arbeitspunkt

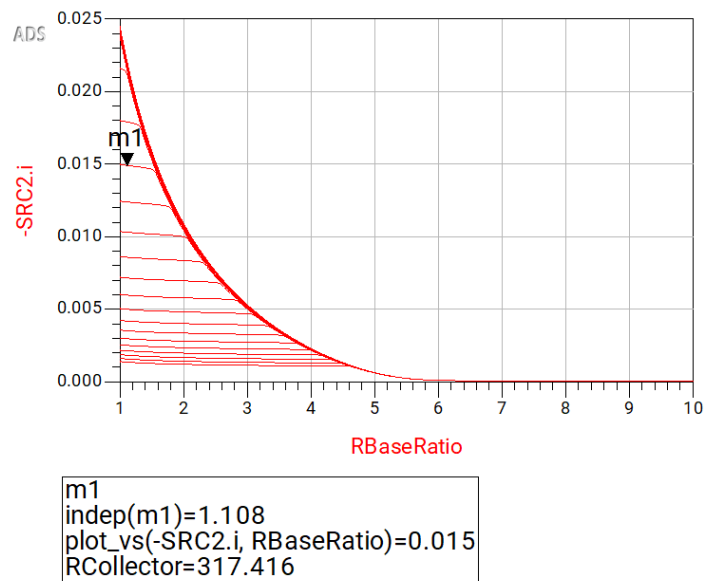


ABBILDUNG 3.2: Verlauf des Kollektorstroms I_C in Abhängigkeit des Kollektorwiderstandes R_5 .

Aus Abbildung 3.2 ist zu erkennen, dass der Kollektorstrom I_C mit steigendem Kollektorwiderstand R_5 abnimmt. Mit dem Marker m1 wird außerdem gezeigt, dass der Kollektorstrom I_C bei einem Widerstandswert von $317,416\,\Omega$ einen Wert von $15\,\text{mA}$ erreicht. Es wird der nächstgrößere Widerstandswert der E12-Reihe gewählt, also $330\,\Omega$, damit I_C nicht überschritten wird. Die Ergebnisse der Rechnung werden somit bestätigt.

3.3.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers

Um einen Arbeitspunkt mit $I_C \approx 10\,\text{mA}$ zu erreichen, wird der Basis-Spannungsteiler dimensioniert. Die Basis-Emitter-Spannung beträgt $U_{BE} \approx 0,7\,\text{V}$.

Auch hier kann die im Kapitel 2.2.2 berechnete Dimensionierung überprüft werden. Beim Sweepen des Widerstandes R_3 im Bereich von $100\ \Omega$ bis $4,7\text{ k}\Omega$ und des damit verbundenen Spannungsteilers, also auch durch das Sweepen des Widerstandes R_4 , ergibt sich folgender Verlauf des Basisstroms I_B in Abhängigkeit des Widerstandes R_3 :

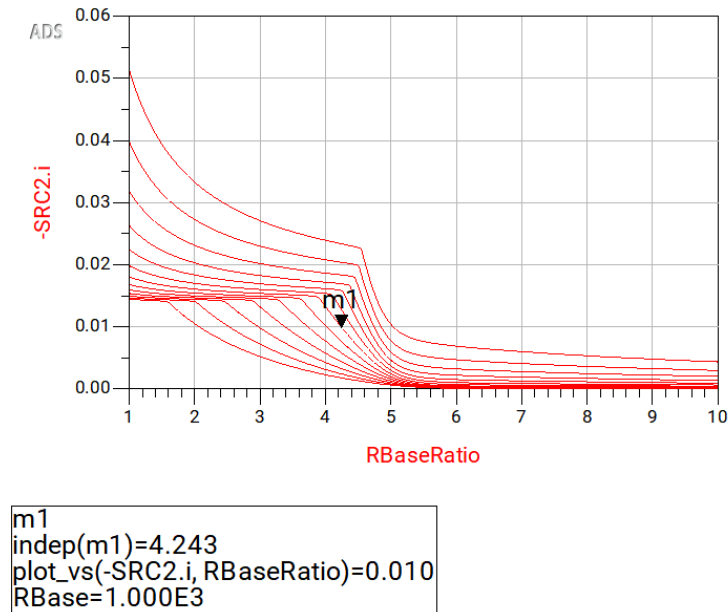



ABBILDUNG 3.3: Verlauf des Basisstroms I_B in Abhängigkeit des Basiswiderstandes R_3 .

Abbildung 3.3 bestätigt, dass der Basiswiderstand R_3 mit einem Wert von $1,0\text{ k}\Omega$ einen Kollektorstrom I_C von 10 mA ergibt. Hierbei ist auch zu erkennen, dass sich ein R_B -Ratio von $4,243$ ergibt. Das bedeutet, dass der Widerstand R_4 einen Widerstandswert von $4,243\text{ k}\Omega$ haben sollte. Bei der Anpassung an die E12-Reihe wird der Widerstandswert auf $4,7\text{ k}\Omega$ gewählt. Dies erfüllt die errechneten Bedingungen für die Widerstandswerte und bestätigt die ausgewählte Dimensionierung.

3.4 S-Parameter-Simulation

Schließlich wird die S-Parameter-Simulation durchgeführt. Diese ist wichtig, um einen angemessenen Gain bei der Übertragung zu gewährleisten. Die S-Parameter-Simulation wird in ADS nach folgenden Schritten durchgeführt:

1. Im ADS-Model wird die Kommentierung des S-Parameter-Controllers aufgehoben, also die S-Parameter-Einstellung wird aktiviert.
2. Da jetzt die DC-Simulation überflüssig ist, wird diese deaktiviert.

3. Vor der Simulation wird die Schrittweite des S-Parameter-Controllers auf 250 MHz gesetzt, sodass die Qualität des Frequenz-Sweeps verbessert wird. 
4. Nach der Simulation wird das Ergebnis in einem neuen Fenster angezeigt. Es ergibt sich folgender Verlauf des Gains für verschiedene Frequenzen:

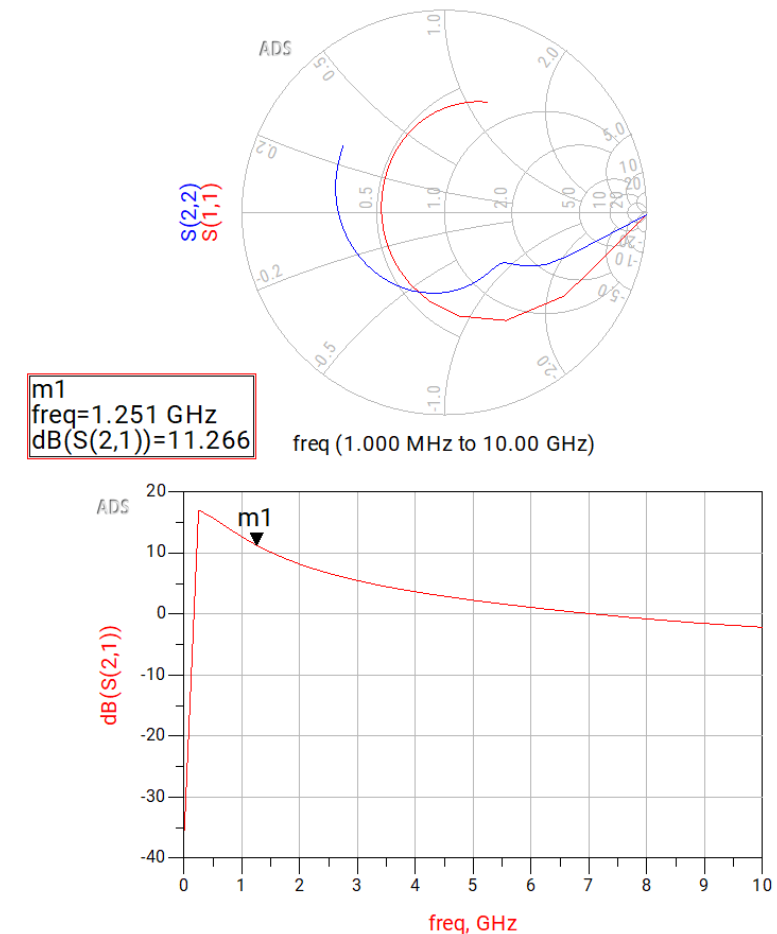



ABBILDUNG 3.4: Ergebnisse der S-Parameter-Simulation.

Hier wählt man die Schaltfläche “Insert A New Marker” aus . Wir setzen den Marker auf den Punkt unserer Arbeitsfrequenz, also bei 1,25 GHz (siehe Abbildung 3.4). Der Marker m1 zeigt eine **Verstärkung (Gain) von 11,266 dB** an.

Die Ergebnisse der Simulation werden bei der technischen Umsetzung der Schaltung überprüft.

3.4.1 Input- und Output Anpassung

Wir beurteilen die Input- und Output-Anpassung der Schaltung mit Hilfe der durch die in der ADS-Simulation erstellten Grafik zur Auswertung der S-Parameter, hier

dargestellt in Abbildung 3.4. Bei der Grafik handelt es sich um ein, bereits durch die Lehrveranstaltung Grundlagen der Nachrichtenübertragung bekanntes Diagramm, das Smith Diagramm. Hier werden zwei Kurvenverläufe über eine Frequenz von 1 MHz bis hin zu 10 GHz dargestellt. Die rote Kurve $S(1,1)$ zeigt den Eingangsreflexionsfaktor und die blaue Kurve $S(2,2)$ den Ausgangsreflexionsfaktor. Wünschenswert wäre ein Verlauf nahe des Zentrums bei $Z = 1 + j0$ da hier die Reflexion null ist und somit die ganze Leistung übertragen wird. Es gilt:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = 0 \Rightarrow Z_L = Z_0 \quad (3.1)$$

Um das zu erreichen muss das Eingangs- und Ausgangsnetzwerk an den Innenwiderstand $Z_0 = 50\Omega$ angepasst werden. In diesem Fall die Bauteile L_2, C_2 für das Eingangsnetzwerk und L_6, C_3 für das Ausgangsnetzwerk.

Kapitel 4

Technische Umsetzung

4.1 Platinenaufbau

Die Platine ist mit mehreren Bauteilen ausgestattet, die bis auf drei selbst zu dimensionierende Widerstände bereits vollständig bestückt ist.

Zur Erklärung von Abbildung 4.1 hier eine kurze Information zu den wichtigsten Abkürzungen:

- R: Widerstand
- C: Kondensator
- J: Stecker/Relais

Die wichtigsten Bauteile sind:

- J1: Anschluss an den FieldFox (Ausgangssignal)
- J40: Verbindung zum Oszillator (Taktquelle für die Schaltung) und Anschluss an den FieldFox (Eingangssignal)
- R47-49: Widerstände zur Arbeitspunkteinstellung
- Oszillator (XLL536C50.000000X): HF-Taktsignal
- Transistor (BFR181W)
- Operationsverstärker (U20-LMV651MG/NOPB; U21-NCX2200GW,125)
- USB-UART-IC (FT232RL)

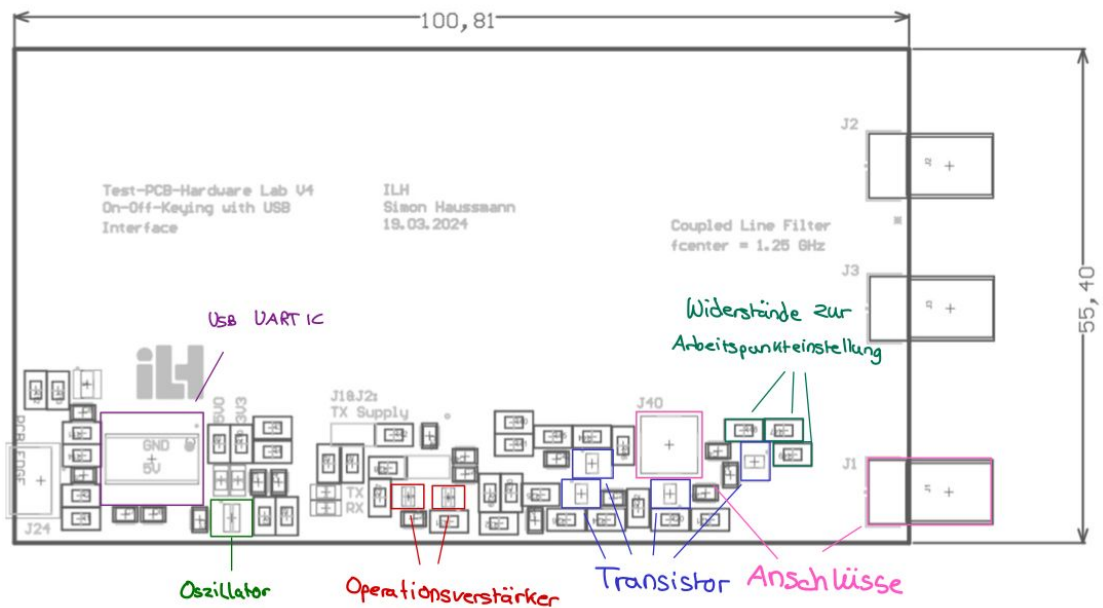


ABBILDUNG 4.1: Bestückungsplan

4.2 Bestückung der PCB

Die in Kapitel 3 bestimmten Widerstände werden nun im Rahmen der praktischen Umsetzung der Schaltung auf die bereits vorbereitete Platine angebracht. Auf dem Bestückungsplan entspricht R47 dem Widerstand R3 mit 1000 Ohm, R48 dem Widerstand R4 mit 4700 Ohm und R49 dem Widerstand R5 mit 330 Ohm. Beim Lötén der drei Widerstände wird auf eine saubere und präzise Löttechnik geachtet, um die gewünschte elektrische, mechanische und HF-technische Funktion der Schaltung zu garantieren.

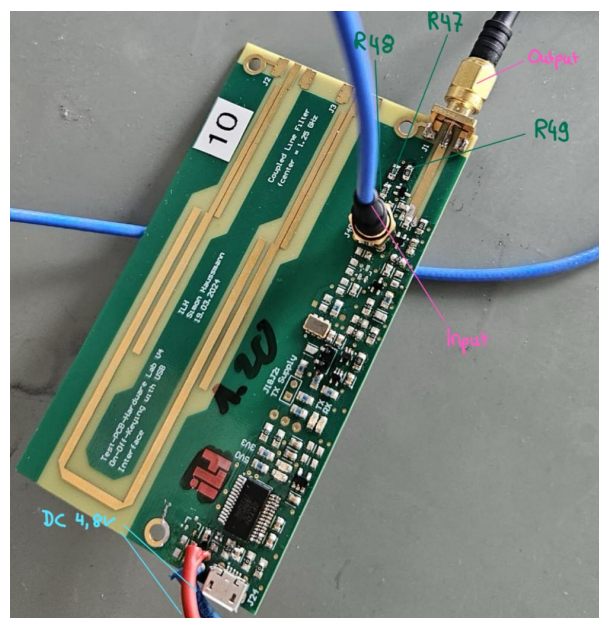


ABBILDUNG 4.2: Bestückte Platine

4.3 DC-Pegel verifizieren

Nach dem Bestücken der Platine wird die Funktionalität der Schaltung überprüft. Hierzu wird eine Versorgungsspannung von 4,8 V angelegt, um die Gleichspannungspegel an den relevanten Punkten der Schaltung zu überprüfen. Die abfallenden Spannungen werden mit einem Oszilloskop gemessen. Relevant sind die Spannungsabfälle über R47, R48 und R49. Diese gemessenen Spannungen werden mit den idealen Werten der Simulation verglichen.

Die Simulation wurde, wie zuvor beschrieben, mit der Software Advanced Design System (ADS) durchgeführt. In der Simulation fällt über R47 eine Spannung von 0,811 V, über R48 eine Spannung von 3,989 V und über R49 eine Spannung von 1,27 V ab. Wir überprüfen nun, ob sich unsere Messung mit den simulierten Werten deckt.

Widerstand	Simulation [V]	Messung [V]
R47	0,811	0,809
R48	3,989	3,991
R49	1,27	1,26

TABELLE 4.1: Vergleich von simulierten und gemessenen Spannungswerten

Die gemessene Werte sind sehr nah an den simulierten Werten und ermöglicht das Vorschreiten mit dem Versuch.

4.4 SOLT-Kalibrierung

Das Ziel der SOLT-Kalibrierung ist es systematische Messfehler, bedingt durch den Messaufbau selbst (Kabel, Adapter, ...) zu eliminieren, um ein präzises Messergebnis zu erreichen. Dafür werden die Messfehler selbst gemessen, um sie bei der richtigen Messung, rauszurechnen. Es gibt dafür vier Kalibrierstandards.

- Short (Kurzschluss): Der Kurzschluss führt zu einer Kompletten Leistungsreflexion mit einer Phasenverschiebung von 180 Grad.
- Open (Leerlauf): Der angeschlossene Leerlauf reflektiert die gesamte Leistung mit einer Phasenverschiebung von 0 Grad
- Load (Abschluss/Last): Ein Lastwiderstand wird angeschlossen. Der Widerstand absorbiert die gesamte Leistung ohne Reflexion und hilft bei der Leistungsanpassung
- Through (Durchgang): Dabei werden beide Messports des VNA miteinander verbunden. Dies ermöglicht eine Korrektur von Phasen- und Amplitudenfehlern des Übertragungspfades.



ABBILDUNG 4.3: Kalibrierungsgerät am Keysight FieldFox

Die Kalibrierung wird am Keysight FieldFox durchgeführt. Sie erfolgt über sieben Schritte, die vom Gerät angeleitet werden. Danach ist das Gerät bereit für die Messung.

4.4.1 Verifizierung der Qualität der SOLT-Kalibrierung

Unter Beibehaltung des Messaufbaus werden nun die S-Parameter, der bei der Kalibrierung verwendeten Kabel, betrachtet. Ist die Kalibrierung gelungen sollte unter optimalen Bedingungen bei den Streuparametern keine Dämpfung mehr angezeigt werden, da die Kalibrierung die Kabeldämpfung herausrechnet. In unserem Fall zeigt die Messung eine kleine Abweichung, ist jedoch sehr nahe am Optimum. Es ist daher keine erneute Kalibrierung von Nöten.

4.4.2 Messen der S-Parameter

Nach der Kalibrierung werden die S-Parameter der Schaltung gemessen. Der für den direkten Vergleich relevante S-Parameter ist S21. Dieser ist in Abbildung 4.4 dargestellt.



ABBILDUNG 4.4: S-Parameter S21

4.5 Vergleich zur Simulation

Im Versuch konnten wir ein Gain von 1.613 dB erreichen. Erwartet wurde der simulierte Gain von etwa 11.3 dB. Die Abweichung kann auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden:

- Die verwendeten Bauteile weichen von den idealen Werten ab und sind teilweise nicht für Hochfrequenztechnik geeignet.
- Die Induktivitäten und Kapazitäten der Leiterbahnen werden nicht in der Simulation berücksichtigt.
- Temperturschwankungen verschieben den Arbeitspunkt des Transistors
- Messungenauigkeite des Spektrumanalysators

Kapitel 5

Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulation des HF-Verstärkers erfolgreich war. Die Aufgaben wurden sinnvoll bearbeitet und stimmen mit der Theorie im Rahmen der Messungenauigkeit überein.

Zum ersten mal in in der Geschichte unseres langen Studium hatten wir die berauschende Erfahrung einen HF-Verstärker in der freien Wildbahn zu beobachten. In den Vorlesungen und Prüfungen mussten wir schon oft die Arbeitspunkteinstellung durchrechnen. Doch durch die E12 Reihe wurde es deutlich schwieriger die richtige Dimensionierung der Widerstände zu finden. Diese Herausforderung war uns zum Anfang des Versuches nicht bewusst. Wir haben alle drei unseren Horizont erweitert und freuen uns auf mehr:)

Literaturverzeichnis

- [1] Infineon Technologies AG: *BFR181W Silicon NPN RF Transistor*, Datenblatt, 2017. Online verfügbar unter: https://ilias3.uni-stuttgart.de/ilias.php?baseClass=ilrepositorygui&cmdNode=z5:o1&cmdClass=ilObjFileGUI&cmd=sendfile&ref_id=4067156 (zugegriffen am 19.05.2025)
- [2] Advanced Test Equipment Corp.: *What is an RF Amplifier?*, o.J.. Online verfügbar unter: <https://www.atecorp.com/solutions/what-is-an-rf-amplifier> (zugegriffen am 17.05.2025)
- [3] Wikipedia: *Verstärker (Elektrotechnik)*, o.J.. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Verst%C3%A4rker_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Verst%C3%A4rker_(Elektrotechnik)) (zugegriffen am 17.05.2025)
- [4] Denisowski, Paul: *S-Parameter verstehen*. In: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, o.J.. Online verfügbar unter: https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/s-parameter-verstehen_257831.html#gallery-7 (zugegriffen am 18.05.2025)
- [5] Simon Haussmann: *Schaltplan_PCB_V4*, 15. April 2024. In: Institut für Robuste Leistungshalbleitersysteme, Universität Stuttgart. Online verfügbar unter: https://ilias3.uni-stuttgart.de/ilias.php?baseClass=ilrepositorygui&cmdNode=z5:o1&cmdClass=ilObjFileGUI&cmd=sendfile&ref_id=4067155 (zugegriffen am 19.05.2025)
- [6] Denisowski, Paul: *Understanding the Smith chart*. In: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, o.J.. Online verfügbar unter: https://www.rohde-schwarz.com/uk/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/understanding-the-smith-chart_257989.html# (zugegriffen am 19.05.2025)
- [7] Schnabel, Patrick: *Arbeitspunkteinstellung*. In: Elektronik-Kompodium Online verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/1506301.htm> (zugegriffen am 20.05.2025)

- [8] Ruppert, Klaus: *Reflexionsfaktor*. In: Wikipedia Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Reflexionsfaktor> (zugegriffen am 20.05.2025)
- [9] Dr. Latzel, Georg: *SOLT Kalibrierung*. In: dl6gl Amateurfunk : <https://dl6gl.de/vnwa-kalibrierung.html> (zugegriffen am 20.05.2025)
- [10] Prof. Jan Hesselbarth: *Allgemein Wissen*. In: Nachrichtentechnik 1 : [Nachrichtentechnik1Skript](#) (zugegriffen am 20.05.2025)