



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

May 19, 2025

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung(Farhad)	4
1.1 Ziel des Versuchs	4
1.2 Relevanz und Anwendungsbereiche von HF-Verstärkern	4
2 Theoretische Grundlagen(Lukass)	5
2.1 Funktion eines HF-Verstärkers	5
2.2 Arbeitspunkteinstellung	6
2.2.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes	6
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(Charhad)	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	12
3.3.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes	12
3.3.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers	13
3.4 S-Parameter-Simulation	13
4 Technische Umsetzung(Erik)	15
4.1 Platinen Aufbau	15
4.2 Bestückung PCB	16
4.3 DC-Pegel Verifizieren	16
4.4 Kalibrierung	16
4.5 Vergleich zur Simulation	16
5 Diskussion der Ergebnisse(GangBang)	17
5.1 Vergleich von Theorie und Praxis	17
5.2 Erklärung von Abweichungen	17
6 Fazit(Jeder)	18

6.1	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	18
6.2	Reflexion und mögliche Verbesserungen	18
6.3	Eigene Reflexion	18
6.3.1	Erik	18
6.3.2	Farhad	18
6.3.3	Lukas	19
Literaturverzeichnis		20

Abkürzungsverzeichnis

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

Kapitel 1

Einleitung(Farhad)

1.1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuches 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 Arbeitspunktes, 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 sind typischerweise im Frequenzbereich von 3 kHz bis 300 GHz ausgelegt und finden Anwendung in verschiedenen Bereichen wie 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 einer großen 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(Lukass)

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 Ruhezustand, wenn kein Signal angelegt ist. Er liegt auf einem bestimmten Punkt der Kennlinie. Je nach Einstellung kann die Schaltung unterschiedlich auf das Eingangssignal reagieren.

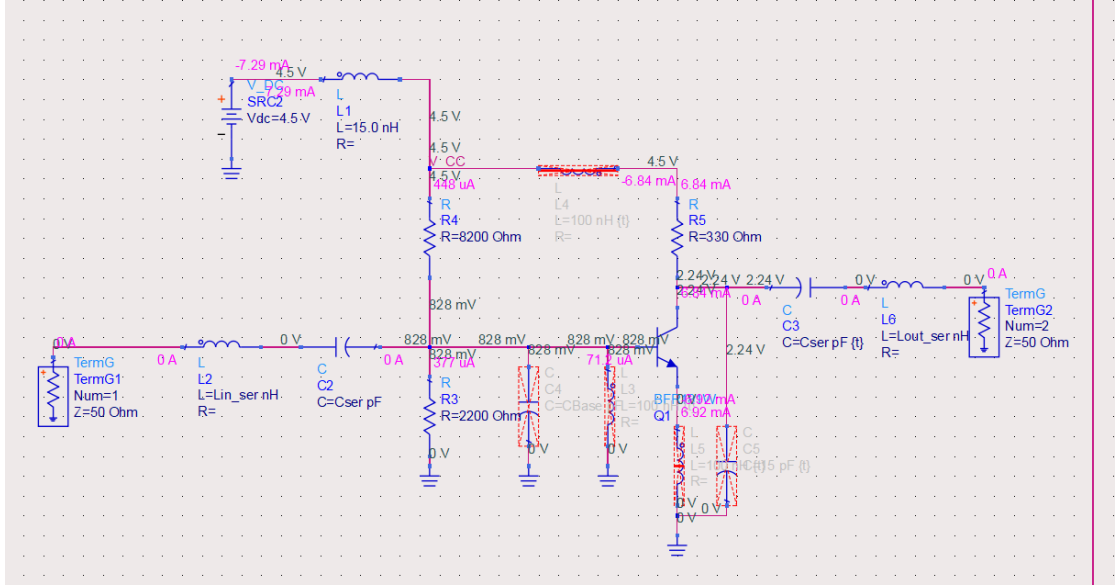


ABBILDUNG 2.1: Emitterschaltung

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 maximalen 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:

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

Angenommen, die Betriebsspannung ist $U_{CC} = 4,8 \text{ V}$, ergeben sich für 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 im Arbeitspunkt ein Kollektorstrom von ca. 10 mA zu erwarten ist und die Simulation ein positives Gain liefert.

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 Toren eines Netzwerks übertragen werden. Sie werden komplex dargestellt, also mit Betrags- und Phasenkomponente. Die Indexnummerierung folgt dem Energiefluss.

- Verläuft die Energie von Tor 1 in Tor 1, heißt der S-Parameter S11.
- Verläuft die Energie von Tor 2 in Tor 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.
- S12 ist der Rückwärtstransmissionsfaktor. Dieser Parameter gibt an, wie gut Tor 1 von Signalen von Tor 2 isoliert ist.
- S22 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.

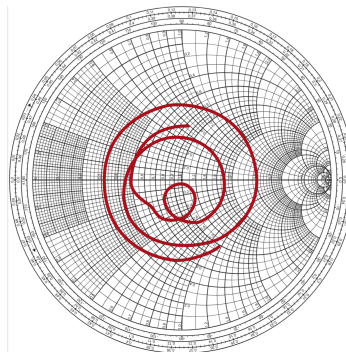


ABBILDUNG 2.2: Smith-Diagramm Beispiel

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 bzw. Koppelkondensatoren in einer Emitterschaltung haben mehrere Aufgaben. Zum einen kompensieren sie Störungen, filtern den Gleichanteil heraus und dienen gleichzeitig als Hochpass.

Kapitel 3

Hochfrequenz-Simulation(Charhad)

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 `TransmitterAmpDesign2024.zip` hinterlegt.

Die Datei wird entpackt und in der Software geöffnet. Außerdem werden die benötigten Bibliotheken aus dem Dateiarhiv **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.

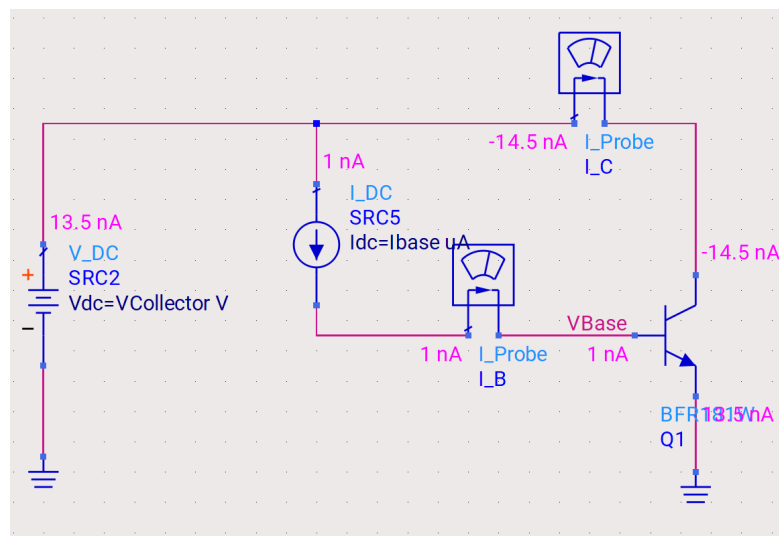


ABBILDUNG 3.1: Schaltbild der Schaltung **TX_Amp_Bias.dds** in **ADS**.

3.2 Analyse des Datenblattes zum Transistor BFR181W

Um die Schaltung zu simulieren, wird der Transistor BFR181W aus der verfügbaren Bibliothek verwendet. Um die genauen Parameter des Transistors zu kennen, wird das Datenblatt analysiert. 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 ?? 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

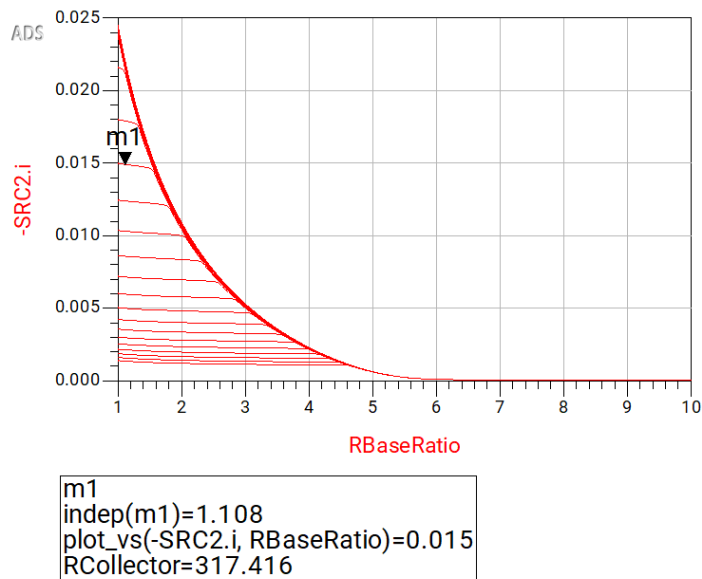


ABBILDUNG 3.2: Verlauf des Kollektorstroms I_C in Abhängigkeit des Kollektorwiderstandes R_5 .

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 $330\ \Omega$. 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 $U_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$. Der Emitterwiderstand wird hier vernachlässigt.

Auch hier kann die im Kapitel ?? berechnete Dimensionierung überprüft werden. Beim Sweepen des Widerstandes R_3 im Bereich von 100Ω 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 :

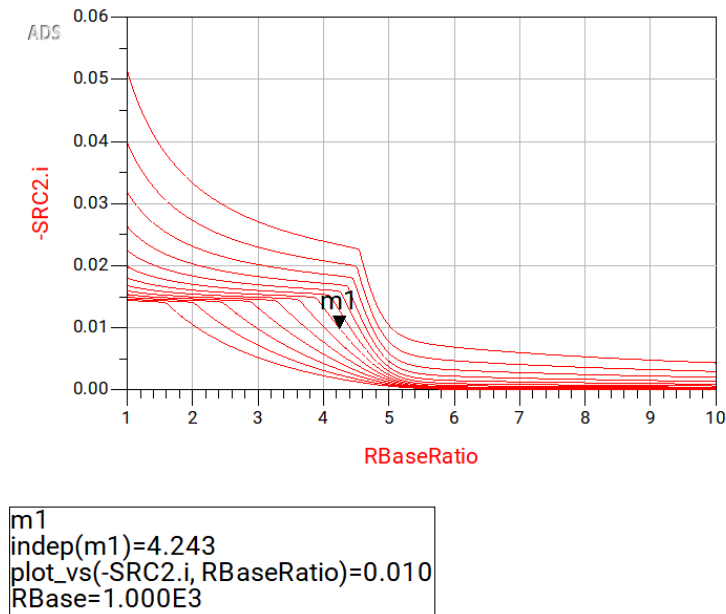



ABBILDUNG 3.3: Verlauf des Basisstroms I_B in Abhängigkeit des Basiswiderstandes R_3 .

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:

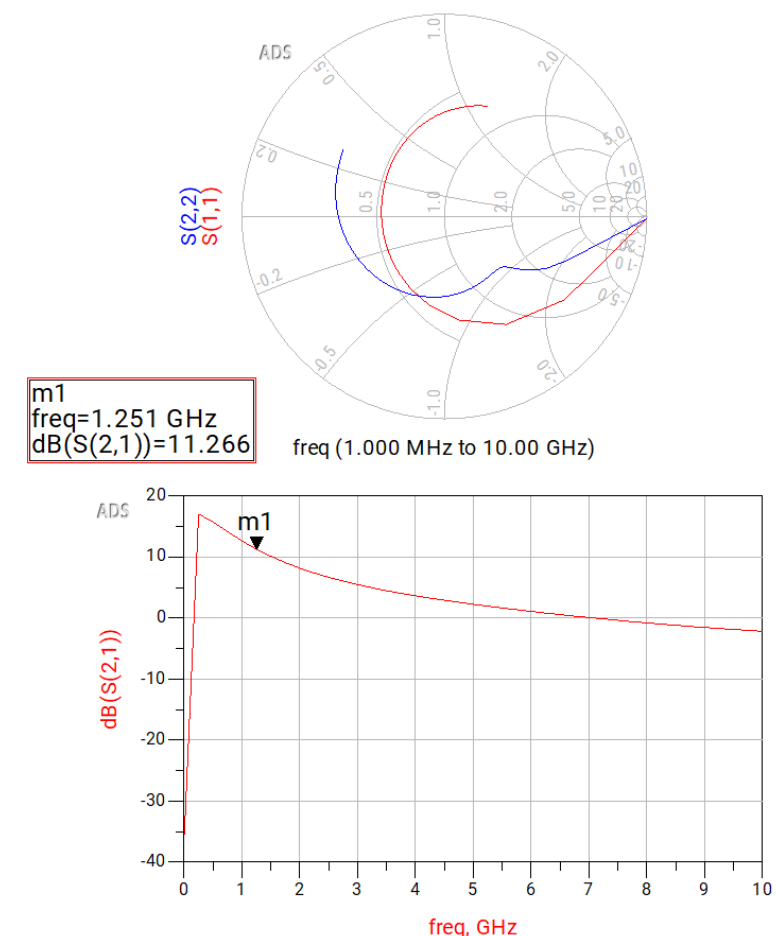



ABBILDUNG 3.4: Ergebnisse der S-Parameter-Simulation.

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.

Kapitel 4

Technische Umsetzung(Erik)

4.1 Platinen Aufbau

Die Platine ist mit mehreren Bauteilen ausgestattet, die bis auf drei selbstdimensionierten Widerständen bereits vollständig bestückt ist.

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

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

Die wichtigsten Bauteile sind:

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

4.2 Bestückung 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 hier R47 R3 mit 1000 Ohm, R48 R4 mit 4700 Ohm und R49 R5 mit 330 Ohm. Bei dem Löten der drei Widerständen wird auf eine saubere und präzise Löttechnik geachtet um die gewollte elektrische, mechanische und HF-technische Funktion der Schaltung zu garantieren.

4.3 DC-Pegel Verifizieren

Nach dem Bestücken der Platine wird die Funktionalität der Schaltung überprüft. Hierzu wird eine Versorgungsspannung von 4.8V angelegt um den Gleichspannungspegel an den relevanten Punkten der Schaltung zu überprüfen. Die abfallenden Spannungen werden mit einem Oszilloskop gemessen. Relevnt sind die Spannungsabfälle über R47, R48 und R49. Diese gemessenen Spannungen werden mit den idealen Werten der Simulation verglichen. Anhand der geringfügigen Abweichung der Spannungen zeigt sich, dass die Bestückung der Platine erfolgreich war und die Schaltung wie gewünscht funktioniert.

4.4 Kalibrierung

4.5 Vergleich zur Simulation

Kapitel 5

Diskussion der Ergebnisse(GangBang)

5.1 Vergleich von Theorie und Praxis

5.2 Erklärung von Abweichungen

bla bla

Kapitel 6

Fazit(Jeder)

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

6.2 Reflexion und mögliche Verbesserungen

6.3 Eigene Reflexion

6.3.1 Erik

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulation des HF-Verstärkers erfolgreich war. Die Aufgaben wurden sinnvoll bearbeitet und stimmen mit der Theorie überein. Der Versuch hat das Verständnis für das in den Vorlesungen bereits angeschnittene theoretische und praktische Verständnis erweitert und weiter vertieft und gibt Lust auf mehr.

6.3.2 Farhad

Zusammenfassend zu der HF-Simulation lässt sich sagen, dass die Simulation der Hochfrequenzschaltung mit [ADS](#) erfolgreich durchgeführt wurde. Die Dimensionierung der Widerstände wurde erfolgreich durchgeführt, um einen stabilen Arbeitspunkt zu erreichen. Auch die S-Parameter-Simulation zeigte ein positives Gain von 11,266 dB bei einer Frequenz von 1,25 GHz. Die Ergebnisse der Simulation stimmen mit den theoretischen Berechnungen überein. Die Software [ADS](#) erwies sich als nützliches Werkzeug zur Analyse und Simulation von Hochfrequenzschaltungen.

6.3.3 Lukas

Der Versuch hat mir zum ersten Mal anschaulich gezeigt, wie ein Verstärker in der Praxis tatsächlich funktioniert. In zahlreichen Vorlesungen haben wir zwar bereits die Arbeitspunkteinstellung und die Dimensionierung von Widerständen theoretisch durchgerechnet, jedoch fehlte bisher der praktische Bezug. Es war daher sehr interessant zu sehen, wie diese Konzepte im realen Aufbau umgesetzt werden und welche Herausforderungen dabei auftreten.

Besonders spannend fand ich die Aufgabe, die Widerstände so zu dimensionieren, dass ein stabiler Arbeitspunkt erreicht wird. Dabei habe ich festgestellt, dass dies in der Praxis deutlich anspruchsvoller ist als in der Theorie, da die Bauteile nicht beliebig gewählt werden können, sondern auf die Werte der E12-Reihe beschränkt sind. Dies erfordert zusätzliche Überlegungen und Anpassungen, um die gewünschten Schaltungseigenschaften zu realisieren.

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
- [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 17.04.2025)
- [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 17.04.2025)
- [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 18.04.2025)