



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
2.3 Bedeutung der S-Parameter	6
2.3.1 Smith-Diagramm	7
2.4 (rolle kopplungskodensator)	7
3 HF-Simulation(Charhad)	8
3.1 Inbetriebnahme von Keysight Advanced Design System (ADS)	8
3.1.1 Installation von ADS	8
3.1.2 Erstellen eines neuen Projekts	8
3.1.3 Vertrautmachen mit der Benutzeroberfläche	8
3.2 Analyse des Datenblattes zum Transistor BFR181W	9
3.3 DC-Simulation	9
3.3.1 Dimensionierung des Kollektorwiderstandes	10
3.3.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers	11
3.4 S-Parameter-Simulation	13
4 Technische Umsetzung(Erik)	15
4.1 Platinen Aufbau	15
4.2 Bestückung PCB	15
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	18
Literaturverzeichnis		19

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 dass, das Ausgangssignal größer als das Eingangssignal ist. Da hierbei dem Signal Leistung hinzugefügt wird, muss ein Verstärker eine eigene Energiequelle haben.

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 dies 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 anders auf das Eingangssignal reagieren.

Einfache EmitterSchaltung:

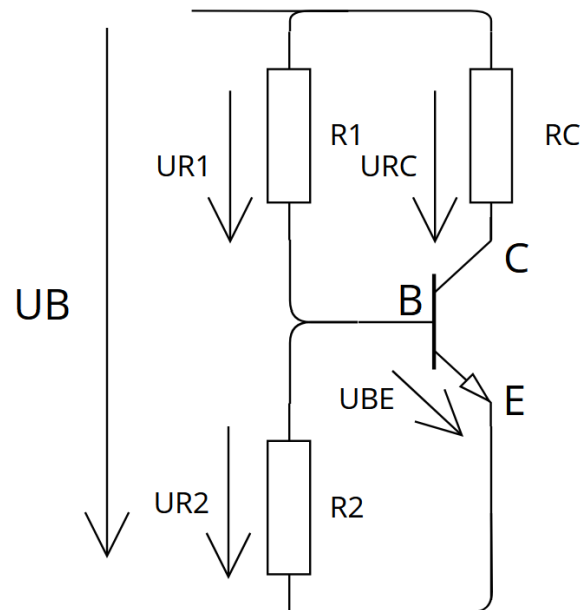


ABBILDUNG 2.1: Emitterschaltung

Gegebene Größen:

$$P_{saflj} : textsc \quad (2.1)$$

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 Index numerierung 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 Eingangssignal zurückreflektiert wird.
- S21 ist der Vorwärtstransmissionsfaktor, Dieser Parameter gibt also 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 Ausgangssignal zurückreflektiert wird.

2.3.1 Smith-Diagramm

Das Smith-Diagramm ermöglicht die grafische Darstellung der S-Parameter. Dafür wird der Real- und Imaginärteil des Reflexionsfaktor in Abhängigkeit von der Frequenzen aufgetragen und ermöglicht dadurch eine einfachere Impedanzanpassung.

2.4 (rolle kopplungskondensator)

blabla

Kapitel 3

HF-Simulation(Charhad)

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 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.

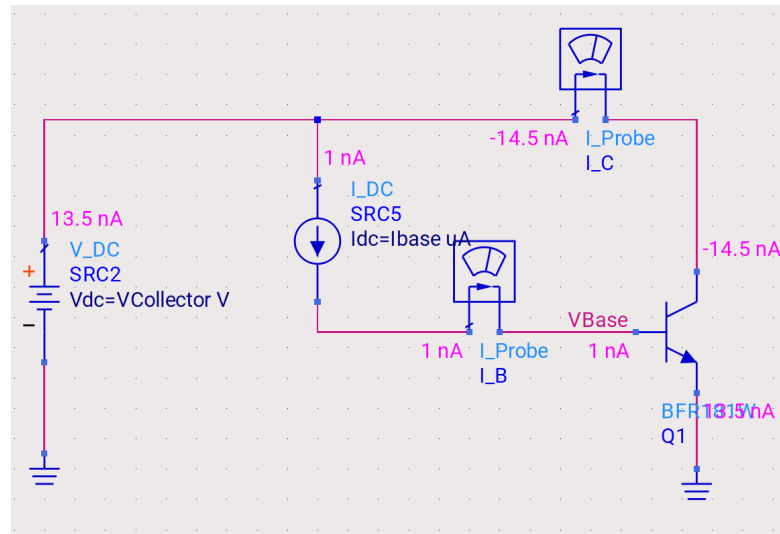


ABBILDUNG 3.1: Schaltbild der Schaltung `TX_Amp_Bias.dds` in ADS.

3.2 Analyse des Datenblattes zum Transistor BFR181W

Um die Schaltung zu simulieren, wird der Transistor BFR181W 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

Folgende Spannungswerte werden angenommen:

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

Zuerst wird der Kollektorwiderstand R_5 so gewählt, dass der Kollektorstrom I_C auf 75 % des maximal zulässigen Kollektorstroms $I_{C,\max}$ gesetzt wird. Dies geschieht, indem der Widerstandswert R_5 so gewählt wird, dass der Kollektorstrom I_C 15 mA beträgt. Der Widerstandswert R_5 wird mit folgender Formel berechnet:

$$R_5 = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C} = \frac{4.8 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 320 \Omega \quad (3.1)$$

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_5 330 Ω . 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.

Dieses Ergebnis lässt sich anhand der Simulation in [ADS](#) verifizieren. Es wird ein Sweep des Kollektorwiderstandes R_5 im Bereich von 100 Ω bis 4,7 k Ω durchgeführt. Es ergibt sich folgender Verlauf des Kollektorstroms I_C in Abhängigkeit des Kollektorwiderstandes R_5 :

Einstellung Arbeitspunkt

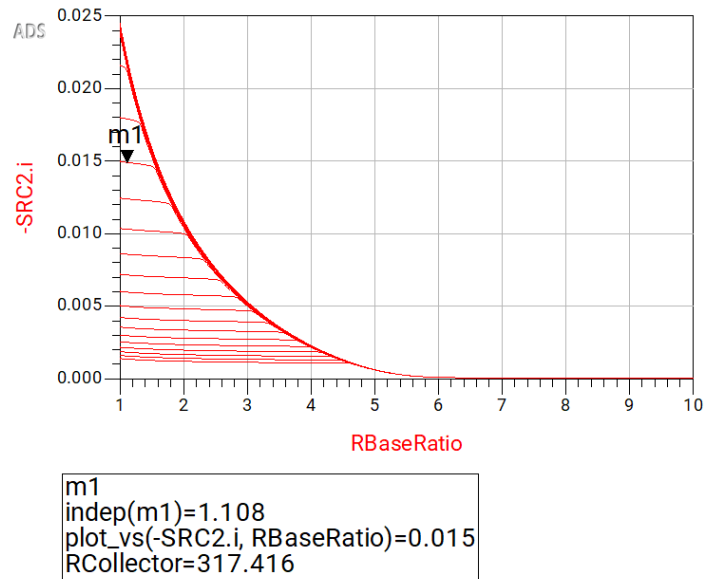


ABBILDUNG 3.2: Verlauf des Kollektorstroms I_C in Abhängigkeit des Kollektorwiderstandes R_5 .

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 Ω einen Wert von 15 mA erreicht. Es wird der nächstgrößere Widerstandswert der E12-Reihe gewählt, also 330 Ω . Die Ergebnisse der Rechnung werden somit bestätigt.

3.3.2 Dimensionierung des Basis-Spannungsteilers

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

Der Basisstrom berechnet sich zu:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (3.2)$$

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

$$I_B = \frac{10 \text{ mA}}{100} = 0,1 \text{ mA} = 100 \mu\text{A} \quad (3.3)$$

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

$$I_Q = 10 \cdot I_B = 1,0 \text{ mA} \quad (3.4)$$

Die Basisspannung U_B ergibt sich zu:

$$U_B = U_{BE} + U_E \approx 0,77 \text{ V} \quad (3.5)$$

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

$$R_3 = \frac{U_B}{I_Q} = \frac{0,77 \text{ V}}{1,0 \text{ mA}} = 0,77 \text{ k}\Omega \quad (3.6)$$

$$R_4 = \frac{U_{CC} - U_B}{I_Q} = \frac{4,8 \text{ V} - 0,77 \text{ V}}{1,0 \text{ mA}} = 4,03 \text{ k}\Omega \quad (3.7)$$

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.

Diese Dimensionierung wird in der Simulation mit [ADS](#) überprüft. 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 :

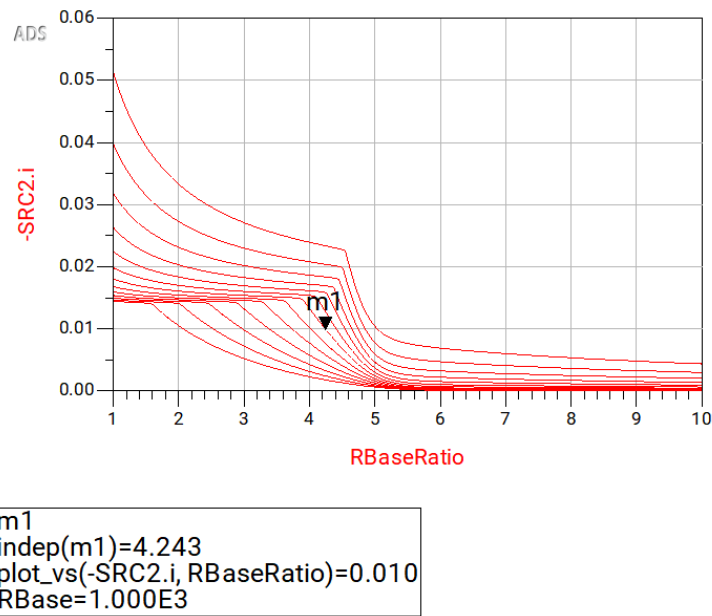



ABBILDUNG 3.3: Verlauf des Basisstroms I_B in Abhängigkeit des Basiswiderstandes R_3 .

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:

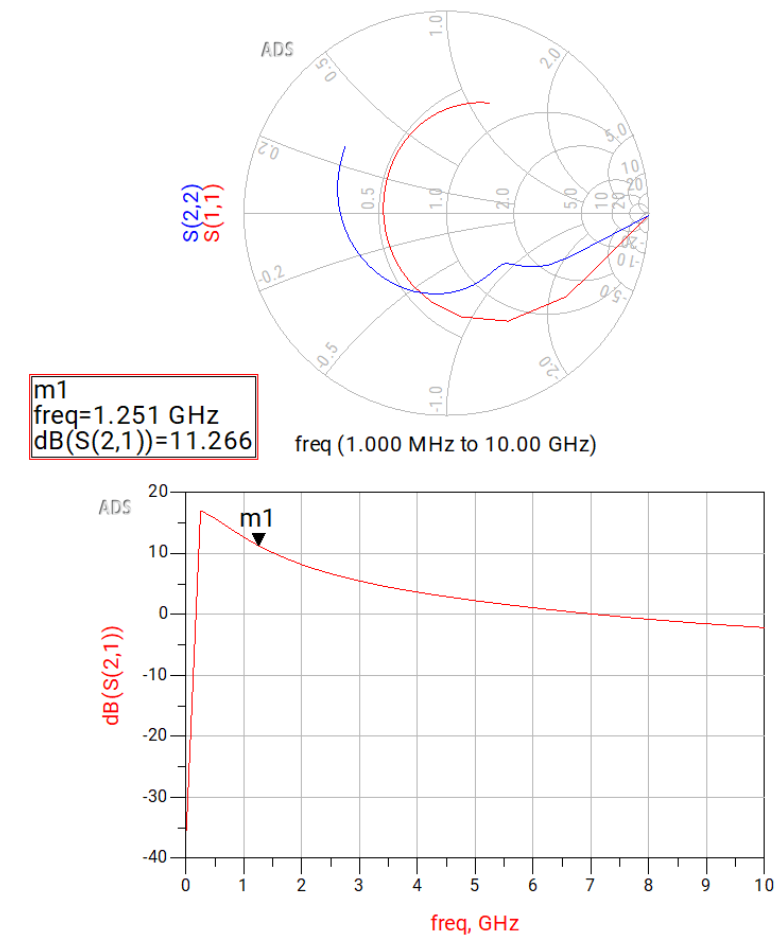



ABBILDUNG 3.4: Ergebnisse der S-Parameter-Simulation.

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.

Die wichtigsten Bauteile sind:

- J1: [Platzhalter für Bauteilbeschreibung]
- J40: [Platzhalter für Bauteilbeschreibung]
- Bauteil 3: [Platzhalter für Bauteilbeschreibung]
- Bauteil 4: [Platzhalter für Bauteilbeschreibung]
- Bauteil 5: [Platzhalter für Bauteilbeschreibung]

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

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

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

bla bla

Literaturverzeichnis

- [1] Infineon Technologies AG: *BFR181W Silicon NPN RF Transistor*, Datenblatt, 2017. Online verfügbar unter: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFR181W-DS-v02_00-en.pdf
- [2] <https://www.atecorp.com/solutions/what-is-an-rf-amplifier> (zugegriffen am 17.04.2025)
- [3] [https://de.wikipedia.org/wiki/Verst%C3%A4rker_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Verst%C3%A4rker_(Elektrotechnik)) (zugegriffen am 17.04.2025)
- [4] 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)