



Universität Stuttgart



Institut für  
Robuste  
Leistungshalbleitersysteme

# Fachpraktikum (Bachelor)

## 6G HARDWARELABOR - DESIGN UND IMPLEMENTIERUNG EINES HF TRANSCEIVERS

---

### Versuch 5: Signalverarbeitung im Empfänger

---

**Protokollführer**

Lukas Müller

Erik Zimmermann

Farhad Valizada

**Betreuer**

Simon Haussmann

**Eingereicht am**

10. Juli 2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Relevanz des Empfängers . . . . .	3
1.2 Ziel des Versuchs . . . . .	3
<b>2 Theoretische Grundlagen des Empfängers</b>	<b>4</b>
2.1 Analyse des Schaltplans vom Empfänger . . . . .	4
2.2 Vorverstärkung des Signals . . . . .	5
2.3 Frequenz-Downkonversion . . . . .	6
2.3.1 Ablauf der Frequenz-Downkonversion in der Schaltung . . . . .	6
2.3.2 Funktion des Widerstands $R_{24}$ . . . . .	7
2.4 Operationsverstärkerschaltung . . . . .	8
2.5 Komparatorschaltung . . . . .	10
<b>3 Versuchsaufbau</b>	<b>12</b>
3.1 Verwendete Geräte . . . . .	12
3.2 Messaufbau . . . . .	12
<b>4 Praktische Durchführung</b>	<b>14</b>
4.1 Vermessung der Sensitivität des Empfängers . . . . .	14
4.1.1 Vermessung der Ausgangsleistung des Empfängers . . . . .	14
4.1.2 Vermessung der Spannung am Kondensator C22 . . . . .	15
4.1.3 Übertragungsfunktion des Empfängers (Ausgangsspannung/Ein- gangsleistung) . . . . .	17
4.2 Operationsverstärkerschaltung . . . . .	18
4.3 Komparatorschaltung . . . . .	21
<b>5 Fazit</b>	<b>23</b>
5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse . . . . .	23
5.2 Reflexion und mögliche Verbesserungen . . . . .	23
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>HF</b>	Hochfrequenz
<b>RF</b>	Radiofrequenz
<b>LO</b>	Local Oscillator
<b>6G</b>	Sixth Generation
<b>SMA</b>	SubMiniature version A
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>OPs</b>	Operationsverstärker

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Relevanz des Empfängers

Ein Signalempfänger ist ein Gerät, das in der heutigen Digital- und Kommunikationstechnik eine zentrale Rolle spielt. Er empfängt Signale, die über verschiedene Medien wie Luft, Kabel oder Glasfaser übertragen werden, und wandelt diese in nutzbare Informationen um. Seine Funktion ist es, die empfangenen Signale zu verstärken, zu filtern und zu demodulieren, um die ursprünglichen Daten wiederherzustellen. Dies ist besonders wichtig in der drahtlosen Kommunikation, wo Signale durch verschiedene Störungen und Rauschen beeinträchtigt werden können.

### 1.2 Ziel des Versuchs

Das Ziel des Versuches 5 im 6G-Hardwarelabor ist es, die Grundlagen der Modulation und Demodulation von Daten zu verstehen und praktisch anzuwenden. Hierzu sollen die einzelnen Funktionsblöcke der Empfängerplatine untersucht werden, um deren Funktionalität zu verstehen. Daraufhin wird die Sensitivität der Empfängerplatine in Abhängigkeit von den Dämpfungsgliedern untersucht. Zuletzt wird die Funktion des Komparators getestet.

## Kapitel 2

# Theoretische Grundlagen des Empfängers

### 2.1 Analyse des Schaltplans vom Empfänger

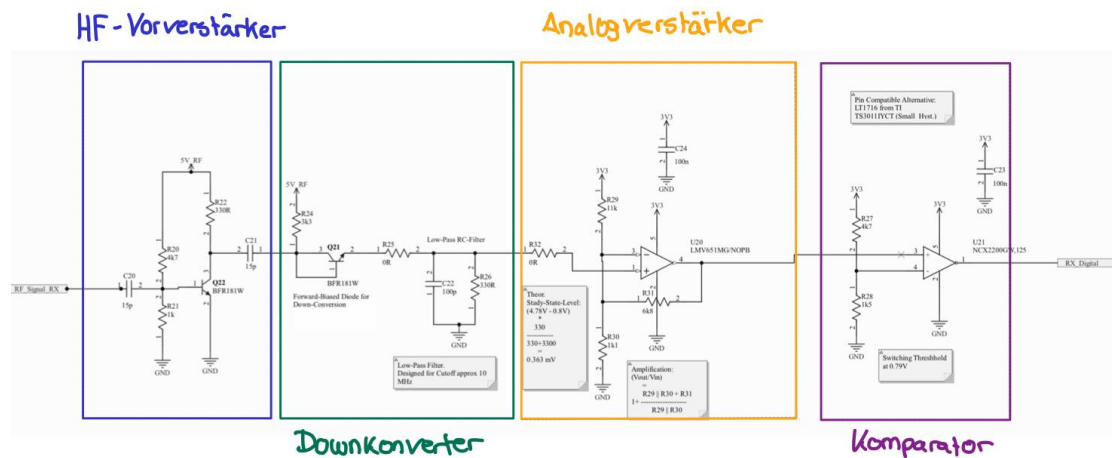


ABBILDUNG 2.1: Schaltplan des Empfängers

Der Empfänger setzt sich aus mehreren Funktionsblöcken zusammen, die das hochfrequente analoge Signal empfangen, vorverstärken, demodulieren, die niederfrequenten Anteile verstärken und anschließend in ein digitales Signal umwandeln. Da in Versuch 4 bereits auf den Schaltplan des Empfängers eingegangen wurde, werden hier nur grob die Funktionsblöcke erläutert und hiermit auf das zuvor abgegebene Protokoll verwiesen. Es folgt jedoch im Rahmen des Versuches noch eine genauere Betrachtung von einzelnen Komponenten.

Der erste Funktionsblock ist der Hochfrequenzvorverstärker. Er besteht aus einer einfachen Transistorschaltung (u. a.), um das durch die Übertragung geschwächte Signal auf ein nutzbares Niveau zu bringen.

Der zweite Funktionsblock ist der Downkonverter. Er besteht aus einem HF-Gleichrichter und einem RC-Tiefpass. Der Zweck ist die Umwandlung des hochfrequenten Signals in ein niederfrequentes Signal und der folgende Tiefpass unterdrückt die hochfrequente Trägerwelle.

Es folgt der Analogverstärker bestehend aus einem Operationsverstärker (u. a.). Er dient dazu, das niederfrequente Signal auf ein geeignetes Niveau zur digitalen Weiterverarbeitung zu bringen.

Der letzte Funktionsblock ist der Komparator. Der Komparator wandelt das analoge Signal in ein digitales Signal um, welches von einem Computer weiterverarbeitet werden kann.

## 2.2 Vorverstärkung des Signals

Die Friis-Formel ist eine wichtige Formel in der Nachrichtentechnik, um die Rauschzahl SNR einer Kette von Verstärkern bzw. Dämpfungsgliedern zu berechnen.

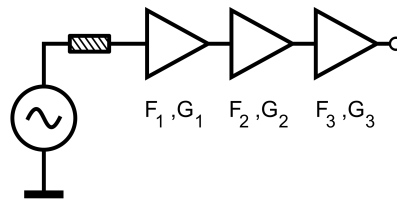


ABBILDUNG 2.2: Verstärkerkette

Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Friis-Formel#/media/Datei:Frijs-Kette.svg>

Für eine Verstärkerkette mit  $n$  Verstärkern ergibt sich die Rauschzahl folgendermaßen:

$$F_{\text{gesamt}} = 1 + (F_1 - 1) + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \quad (2.1)$$

- $F_{\text{gesamt}}$ : Die Gesamte Rauschzahl der Verstärkerkette
- $F_i$ : Die Rauschzahl des  $i$ -ten Verstärkers
- $G_i$ : Die Verstärkung des  $i$ -ten Verstärkers

Es wird schnell ersichtlich, dass Verstärker am Anfang der Kette den meisten Einfluss auf die Gesamtrauschzahl haben. Deswegen sollten die Verstärker mit der höchsten Verstärkung immer am Anfang der Kette stehen. Andersherum sollten Bauteile mit Dämpfung am Ende der Kette stehen.

Deshalb sollte ein Signal immer zuerst vorverstärkt werden, bevor die Frequenzkonversion durchgeführt wird. Würde das Signal zuerst gemischt und dann nachverstärkt werden, hätten wir im Vergleich ein deutlich höheres Rauschen, da der Verstärker im Vergleich zum Mischer eine höhere Verstärkung hat. Je nach Mischer kann dieser sogar auch dämpfend wirken.

## 2.3 Frequenz-Downkonversion

Im Folgenden wird die Frequenz-Downkonversion des analogen Signals erklärt, das bereits vor dem Eingang in den Downkonverter verstärkt wurde.

### 2.3.1 Ablauf der Frequenz-Downkonversion in der Schaltung

In Abbildung 2.3 ist die Schaltung des Downkonverters zu sehen.

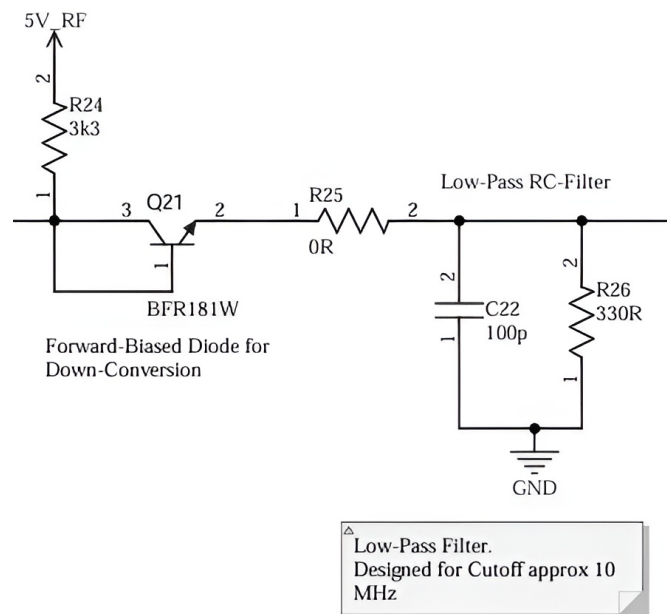


ABBILDUNG 2.3: Schaltung des Downkonverters

Ein Downkonverter stellt einen einfachen Abwärtsmischer dar, der dazu dient, ein hochfrequentes Eingangssignal in ein niederfrequentes Ausgangssignal umzuwandeln.

Zuerst gelangt das hochfrequente Signal in den Transistor Q21 (BFR181W), der in diesem Fall nicht als Verstärker, sondern als Diode betrieben wird, da Basis und Kollektor miteinander verbunden sind. Somit wird effektiv nur die Basis-Emitter-Strecke des Transistors benutzt. Der Transistor ist ein **nichtlineares** Bauelement. Ein nichtlineares Bauelement wird zum Mischvorgang in diesem Zusammenhang benötigt, da es die Amplitudendemodulation des Signals ermöglicht.

An den Eingang des Mischers, also des Transistors Q21, werden normalerweise zwei Signale angelegt: das eigentliche Radiofrequenz (RF)-Signal, welches in diesem Fall bei 1,25 GHz liegt, und ein Local Oscillator (LO)-Signal.

Wenn die beiden Signale die vorgespannte Diode passieren, erzeugen diese aufgrund der nichtlinearen Eigenschaften des Transistors eine Mischung der beiden Signale. Die neuen Frequenzen sind hierbei die Summe  $f_{RF} + f_{LO}$  und die Differenz  $f_{RF} - f_{LO}$  der Eingangsfrequenzen.

Nach der erfolgreichen Abwärtsmischung des Signals kommt es zu einer Signalfilterung. Dazu wird direkt nach dem Transistor Q21 ein RC-Tiefpassfilter geschaltet, der die Frequenz  $f_{RF} + f_{LO}$  herausfiltert und nur das niederfrequente Differenzsignal  $f_{RF} - f_{LO}$  passieren lässt. Der Filter besteht aus den Bauelementen R26 (330  $\Omega$ ) und C22 (100 pF). Der Kondensator ist dabei so dimensioniert, dass der Filter insgesamt eine Grenzfrequenz von  $f_c = 10$  MHz aufweist. Dies widerspricht zwar dem rechnerischen Wert, der sich aufgrund der Werte von R26 und C22 ergibt, also:

$$f_{c,\text{rechnerisch}} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.2)$$

Dies lässt sich jedoch durch Vereinfachungen im Schaltplan oder die Tatsache, dass hier ein idealer Tiefpassfilter angenommen wird, erklären. Außerdem ist es bei hohen Frequenzen zu beachten, dass die Leiterbahnen in der Schaltung parasitäre Effekte aufweisen (in Form von Induktivitäten und Kapazitäten), die ebenfalls die Grenzfrequenz beeinflussen können. Diese wurden in der oben ausgeführten Berechnung nicht berücksichtigt.

Jedoch liegt in diesem Fall ein passiver Abwärtsmischer vor, da hier kein LO zur Anwendung kommt. Trotzdem funktioniert die Abwärtsmischung des Signals, da der Transistor Q21, wie bereits erklärt, ein nichtlineares Bauelement ist.

### 2.3.2 Funktion des Widerstands R<sub>24</sub>

Die Widerstände R24 und R26 bilden einen Spannungsteiler, der den Arbeitspunkt des Transistors Q21 festlegt. Hierbei sollte der Arbeitspunkt durch die Widerstände R24



und R26 so gewählt werden, dass der Transistor eine möglichst starke Krümmung auf der Kennlinie im Arbeitspunkt aufweist und damit stark nichtlinear ist. Dadurch wird eine optimale Signalverarbeitung ermöglicht, da der Transistor in der Lage ist, das Signal richtig zu demodulieren und weiterzuleiten. Ohne R24 könnte der Transistor übersteuert werden, was zu Verzerrungen im Signal oder zur Zerstörung des Transistors führen würde. Durch die Vorspannung des Transistors Q21 über den Widerstand R24 wird der Transistor Q21 knapp unterhalb seines leitenden Bereichs betrieben, sodass er für kleinere Signale empfindlich ist. Das hat eine Verbesserung der Mischungseigenschaften des Transistors zur Folge.

## 2.4 Operationsverstärkerschaltung

Der Operationsverstärker, der im PCB des Praktikums verbaut ist, ist hier zu sehen:

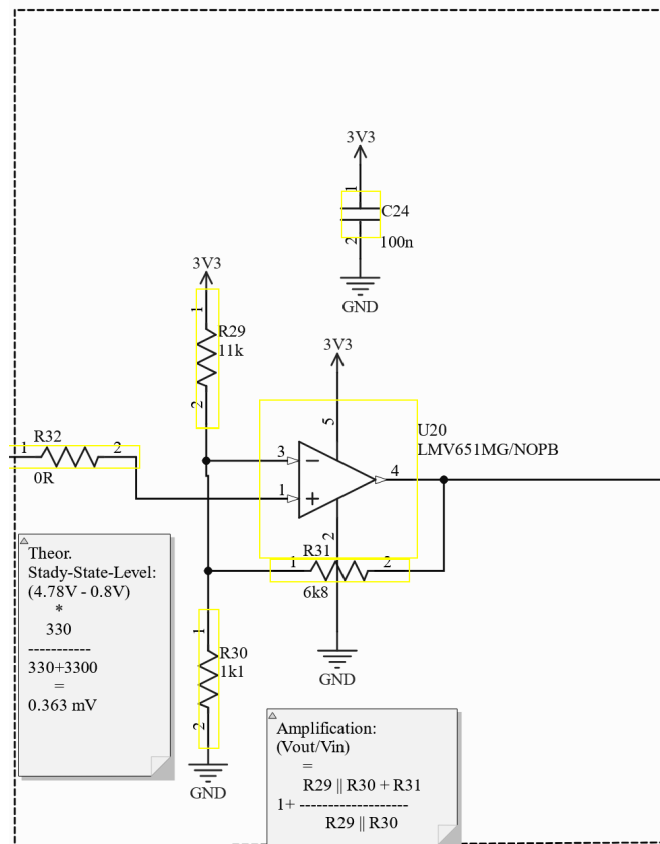


ABBILDUNG 2.4: Operationsverstärkerschaltung

Es handelt sich um einen nichtinvertierenden Operationsverstärker. Für die Übertragung eines generellen nichtinvertierenden Operationsverstärkers gilt:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}} \quad (2.3)$$

Für die gegebene Schaltung in Abbildung 2.4 gilt:

- $R_f$ : Widerstand zwischen Ausgang und invertierendem Eingang ( $R_{31}$ )
- $R_{in}$ : Paralleler Ersatzwiderstand  $R_{29}$  und  $R_{30}$  ( $R_{29} \parallel R_{30}$ ), da sie den Spannungsteiler am invertierenden Eingang bilden
- $R_{29} = 11\text{k}\Omega$
- $R_{30} = 1,1\text{k}\Omega$
- $R_{31} = 6,8\text{k}\Omega$

Somit ergibt sich die Transferfunktion von:

$$V = \frac{U_{out}}{U_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_{in}} = 1 + \frac{R_{31}}{R_{29} \parallel R_{30}} = \frac{(R_{29} \parallel R_{30} + R_{31})}{R_{29} \parallel R_{30}} \quad (2.4)$$

Die eingesetzten Widerstandswerte ergeben den Übertragungsfaktor:

$$V = \frac{U_{out}}{U_{in}} = 1 + \frac{6,8\text{k}\Omega}{(11\text{k}\Omega \parallel 1,1\text{k}\Omega)} = 7,8 \quad (2.5)$$

Für den weiteren Verlauf des Versuches wird die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung benötigt. Diese lautet:

$$U_{out}(U_{in}) = V \cdot U_{in} - U_{offset} \quad (2.6)$$

Das Offset ergibt sich wie folgt:

$$U_{offset} = U_{offset, Quelle} \cdot \left( \frac{R_{30} \parallel R_{31} + R_{29}}{R_{30} \parallel R_{31}} \right) \cdot \left( \frac{R_{29} \parallel R_{30}}{R_{29} \parallel R_{30} + R_{31}} \right) \quad (2.7)$$

mit  $U_{offset, Quelle} = 3,3\text{V}$  erhält man durch Einsetzen der Widerstandswerte:

$$U_{offset} = 2,04\text{V} \quad (2.8)$$

Das ergibt für die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung:

$$U_{out}(U_{in}) = 7,8 \cdot U_{in} - 2,04\text{V} \quad (2.9)$$

R29 ist wichtig zum einen für die DC-Arbeitspunkteinstellung des OPs, wenn kein Signal angelegt ist, da er dort mit R30 einen Spannungsteiler bildet. Ebenso dient er zur Einstellung des Spannungsoffsets des OPs. Wird ein Signal angelegt, so ist R29 vor allem wichtig für das Einstellen der Verstärkung.

## 2.5 Komparatorschaltung

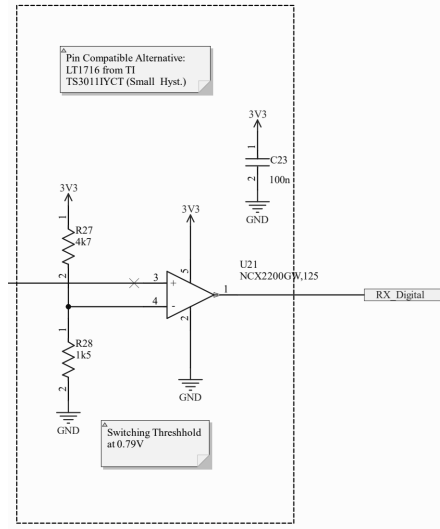


ABBILDUNG 2.5: Komparator-Schaltung

Die Abbildung 2.5 stellt den Komparator dar, der dazu dient, das analoge verstärkte Signal  $S_{BB}(t)$  in ein digitales Signal umzuwandeln für eine nachfolgende digitale Verarbeitung. Der Komparator besteht aus einem Operationsverstärker (Typ NCX2200GW), einem Spannungsteiler aus zwei Widerständen R27 und R28 und wird mit einer Betriebsspannung von 3,3V betrieben. Die am nichtinvertierenden Eingang anliegende Signalspannung  $S_{BB}(t)$  wird mit einer Referenzspannung  $U_{Ref}$  am invertierenden Eingang verglichen. Dieser Schaltschwellwert ergibt sich wie folgt:

$$U_{Ref} = \frac{R_{28}}{R_{27} + R_{28}} \cdot 3,3 \text{ V} = \frac{1,5 \text{ k}\Omega}{4,7 \text{ k}\Omega + 1,5 \text{ k}\Omega} \cdot 3,3 \text{ V} \approx 0,798 \text{ V} \quad (2.10)$$

In Abhängigkeit von der Signalspannung  $S_{BB}(t)$  wird der Ausgang des Komparators auf High oder Low gesetzt.

$$S_{BB}(t) > 0,798 \text{ V} \implies \text{HIGH}$$

$$S_{BB}(t) < 0,798 \text{ V} \implies \text{LOW}$$

Dadurch wird ein binäres digitales Ausgangssignal erzeugt, das von einem Computer weiterverarbeitet werden kann.

$$S_{BB}(t) \rightarrow S_{RX}(t)$$

Der Schaltschwellwert  $U_{Ref}$  wurde so gewählt, dass groß genug Signale sicher erkannt werden. Dabei werden jedoch Rauschen und Störsignale ignoriert.

# Kapitel 3

## Versuchsaufbau

### 3.1 Verwendete Geräte

Im Versuch werden folgende Geräte verwendet:

- **Keysight FieldFox Network Analyzer N9918A:** Zur Messung der S-Parameter der Sendeplatine.
- **Sendeplatine:** Die Sendeplatine wird verwendet, um die Trägerfrequenz zu erzeugen und modulierte Signale zu generieren.
- **Empfängerplatine:** Die Empfängerplatine empfängt die modulierten Signale und demoduliert sie, um die ursprünglichen Daten wiederherzustellen. Sie wird an den FieldFox Network Analyzer N9918A angeschlossen, um die S-Parameter zu messen.
- **Multimeter VOLTcraft VC871:** Zur Messung der Spannung an den verschiedenen Punkten der Schaltung.
- **Dämpfungsglieder:** Zur Variation der empfangenen Leistung.
- **Koaxialkabel:** Zur Verbindung der Sende- und Empfängerplatine mit dem FieldFox Network Analyzer.

### 3.2 Messaufbau

Wie man später in der Versuchsbeschreibung erfahren wird, besteht die Messung aus folgenden Schritten:

1. Zuerst wird die Sendeplatine an die Versorgungsspannung angeschlossen, um den Sender zu aktivieren.
2. Es wird eine SMA-Verbindung zwischen der Sendeplatine und dem FieldFox hergestellt, um die Sendeleistung zu messen.
3. Nach einer Messung der Leistung des Senders wird auch die Empfängerplatine an eine Versorgungsspannung angeschlossen, die Sendeplatine vom FieldFox getrennt und mit der Empfängerplatine über SMA-Kabel verbunden. Der Sender wird mit einer Spannung von  $4,8\text{ V}$  gespeist.
4. Stück für Stück werden die Dämpfungsglieder in den Signalweg eingefügt, um die empfangene Leistung zu variieren. Die Spannung am Kondensator C22 der Empfängerplatine wird hierbei mit einem Multimeter gemessen.
5. Zuletzt wird eine zusätzliche Spannung am Einspeisepunkt des Komparators angelegt und zwischen  $0,9\text{ V}$  und  $1,4\text{ V}$  variiert, um die Funktion des Komparators zu testen. Die Spannung am Kondensator C22 wird hierbei ebenfalls gemessen.

## Kapitel 4

# Praktische Durchführung

Jetzt wird zur praktischen Umsetzung der Signalverarbeitung im Empfänger übergegangen. Der Versuch besteht aus mehreren Teilen, die jeweils verschiedene Aspekte der Signalverarbeitung behandeln.

### 4.1 Vermessung der Sensitivität des Empfängers

#### 4.1.1 Vermessung der Ausgangsleistung des Empfängers

Eine grobe Veranschaulichung des Versuchsaufbaus für die Vermessung der Leistung ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Als erstes wird die Sensitivität des Empfängers vermessen. Dazu wird eine zweite Platine (Senderplatine) verwendet, die lediglich als ein Single-Tone-Sender fungiert. Die Ausgangsleistung des Senders wird mit dem Spektrumanalysator als Referenz gemessen.

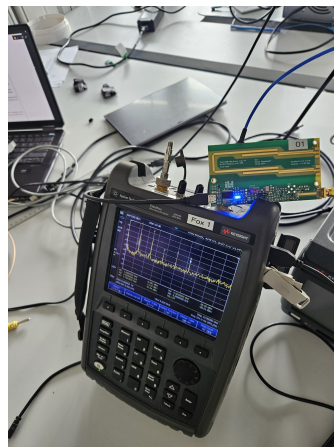


ABBILDUNG 4.1: Versuchsaufbau zur Vermessung der Ausgangsleistung des Empfängers

Insgesamt wurde ein Leistungsspektrum des Senders gemessen, welches in Abbildung 4.2 zu sehen ist. Zur genauen Vermessung sind die Werte bei den Harmonischen von 1,25 GHz mit Markern versehen, um die genaue Leistung zu bestimmen.

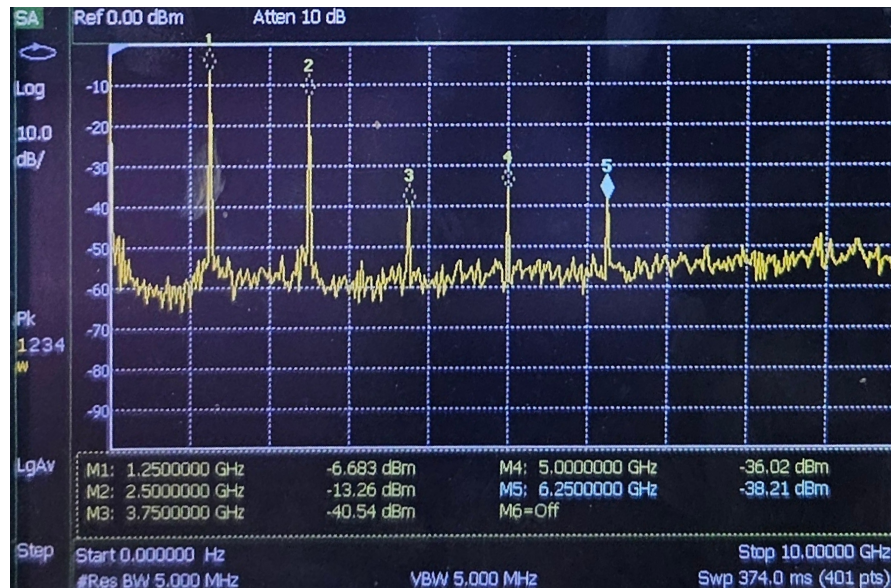


ABBILDUNG 4.2: Leistungsspektrum des Senders

#### 4.1.2 Vermessung der Spannung am Kondensator C22

Die DC-Spannung am Kondensator C22 wird jetzt auf der Empfängerplatine gemessen. Hierbei werden verschiedene Dämpfungsglieder verwendet, um die empfangene Leistung zu variieren. Eine grobe Veranschaulichung des Versuchsaufbaus dafür ist in Abbildung 4.3 zu sehen.



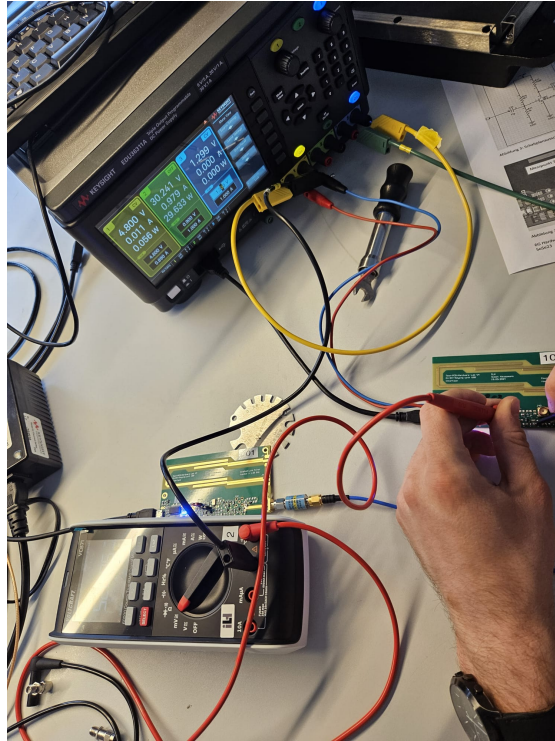


ABBILDUNG 4.3: Versuchsaufbau zur Vermessung der Spannung am Kondensator C22

Um die Spannung am Kondensator C22 in Abhängigkeit der Eingangsleistung zu bestimmen, benötigen wir die Sendeleistung des Senders, aus Abbildung 4.2 ist die Leistung bei 1,25 GHz bei etwa  $-6,7 \text{ dBm}$ . Nach Versuch 1 ist die Dämpfung des Koaxialkabels bei etwas  $0,45 \text{ dB}$ , daraus ergibt sich eine Sendeleistung von  $-6,25 \text{ dBm}$ . Die Spannung am Kondensator C22 wird mit einem Multimeter gemessen. Die Ergebnisse in Abhängigkeit der Dämpfung und Empfangsleistung sind in Tabelle 4.1 zu sehen.

Dämpfungsglied	Empfangene Leistung [dBm]	Spannung am C22 [mV]
0 dB + Kabel	-6,683	386,47
3 dB + Kabel	-9,683	383,20
6 dB + Kabel	-12,683	379,85
10 dB + Kabel	-16,683	375,10
13 dB + Kabel	-19,683	372,90
20 dB + Kabel	-26,683	368,90
26 dB + Kabel	-32,683	368,27

TABELLE 4.1: Messwerte der Spannung am Kondensator C22

Wie man der Tabelle 4.1 entnehmen kann, fällt die Spannung am Kondensator C22 mit zunehmender Dämpfung des Senders ab. Dies ist zu erwarten, da die Leistung des

Senders mit zunehmender Dämpfung verringert wird, was zu einer geringeren Spannung am Kondensator führt.

#### 4.1.3 Übertragungsfunktion des Empfängers (Ausgangsspannung/Eingangsleistung)

Insgesamt stellt es sich heraus, dass diese Schaltung wie ein HF-Detektor (Schwellenwertdetektor) funktioniert. Das eingehende Hochfrequenzsignal wird gleichgerichtet und die DC-Spannung am Kondensator C22 ist proportional zur Leistung des eingehenden Signals, also  $P \propto U_{\text{in}}^2$ , wobei  $U_{\text{in}}$  die Eingangsspannung ist. Die Beziehung zwischen der Spannung am Kondensator und der Leistung des eingehenden Signals ist quadratisch. Das liegt daran, dass das Eingangssignal des Empfängers hoch genug dafür ist, dass er insgesamt im linearen Bereich arbeitet.

Hier sind jedoch einige Effekte zu beachten, die die Übertragungsfunktion beeinflussen können. Erstens fließt aufgrund der Arbeitspunkteinstellung des Transistors Q21 ein Strom durch den Widerstand R26. Die entsprechende Spannung  $V_{\text{offset}}$  beträgt ungefähr  $368,27 \text{ mV}$  und muss aus der Beziehung herausgerechnet werden, um die Übertragungsfunktion zu erhalten. Außerdem ist eine den Bauteilen der Schaltung charakteristische Konstante  $k$  zu berücksichtigen, die die Übertragungsfunktion beeinflusst. Diese Konstante kann experimentell bestimmt werden.

Die Übertragungsfunktion des Empfängers kann also wie folgt dargestellt werden:

$$U_{\text{out}} = k \cdot \sqrt{P_{\text{in}}} - U_{\text{offset}} \quad (4.1)$$

wobei  $U_{\text{offset}}$  die Spannung am Widerstand R26 ist, die den Arbeitspunkt des Transistors Q21 festlegt.

Hier möchten wir den Wert von  $k$  für unterschiedliche Eingangsleistungen und dadurch auch Ausgangsspannungen ausrechnen. Dafür stellen wir die Gleichung 4.1 nach  $k$  um. Es ergibt sich die folgende Gleichung:

$$k = \frac{U_{\text{out}} + U_{\text{offset}}}{\sqrt{P_{\text{in}}}} \quad (4.2)$$

Setzt man die in der Tabelle 4.1 berechneten Werte in die Gleichung 4.2 ein, so ergeben sich folgende Werte:

Dämpfungsglied	Empfangene Leistung [mW]	Spannung am C22 [mV]	k [ $\frac{V}{\sqrt{mW}}$ ]
0 dB + Kabel	0,215	386,47	1,63
3 dB + Kabel	0,107	383,20	2,30
6 dB + Kabel	0,054	379,85	3,22
10 dB + Kabel	0,021	375,10	5,13
13 dB + Kabel	0,011	372,90	7,07
20 dB + Kabel	0,0022	368,90	15,72
26 dB + Kabel	0,0005	368,27	32,94

TABELLE 4.2: Messwerte der Spannung am Kondensator C22

Rechnet man den das arithmetische Mittel von  $k$  aus, ergibt sich der folgende Wert:

$$k = 9,72 \frac{V}{\sqrt{mW}} \quad (4.3)$$

## 4.2 Operationsverstärkerschaltung

Der DC-Arbeitspunkt, wenn kein Signal anliegt, konnte messtechnisch auf etwa  $365mV$  bestimmt werden.

Nun wird mit einer zweiten Spannungsquelle vor der Diode eine Spannung eingespeist und dabei die Transferfunktion  $V_{out}/V_{in}$  vermessen. Der Spannungsbereich dieser Hilfsspannungsquelle  $V_{in}$  wird von 0,9V in 0,01V-Schritten bis 1,4V erhöht. Da das Protokoll so übersichtlich wie möglich gehalten werden soll, wird in der folgenden Tabelle nur ein kleiner Ausschnitt der Messwerte gezeigt. Bei genauer Betrachtung der Mess-

$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (mV)
0,9	0,15571
1,0	0,24478
1,1	0,33307
1,2	0,42666
1,3	0,52090
1,4	0,61620

TABELLE 4.3: Messwerte von  $V_{in}$  und  $V_{out}$  ohne Verstärkung

werte wurde offensichtlich, dass die Platine beschädigt ist. Es findet keine Verstärkung statt. Daher werden nun im weiteren Verlauf zwei Messungen betrachtet. Eine Messung ohne Verstärkung und eine Messung mit Verstärkung, die von unseren Kommilitonen durchgeführt wurde. Hier werden etwas mehr Messwerte zu einer groben Veranschaulichung benötigt.

$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (mV)
0,9	0,039
1,0	0,047
1,03	0,077
1,06	0,242
1,1	0,531
1,2	1,258
1,3	1,994
1,4	2,741

TABELLE 4.4: Messwerte von  $V_{in}$  und  $V_{out}$  mit Verstärkung

In Abbildung 4.4 ist die Transferfunktion  $V_{out}/V_{in}$  dargestellt. Die geplote Transferfunktion wurde unter Berücksichtigung aller Messwerte erstellt.

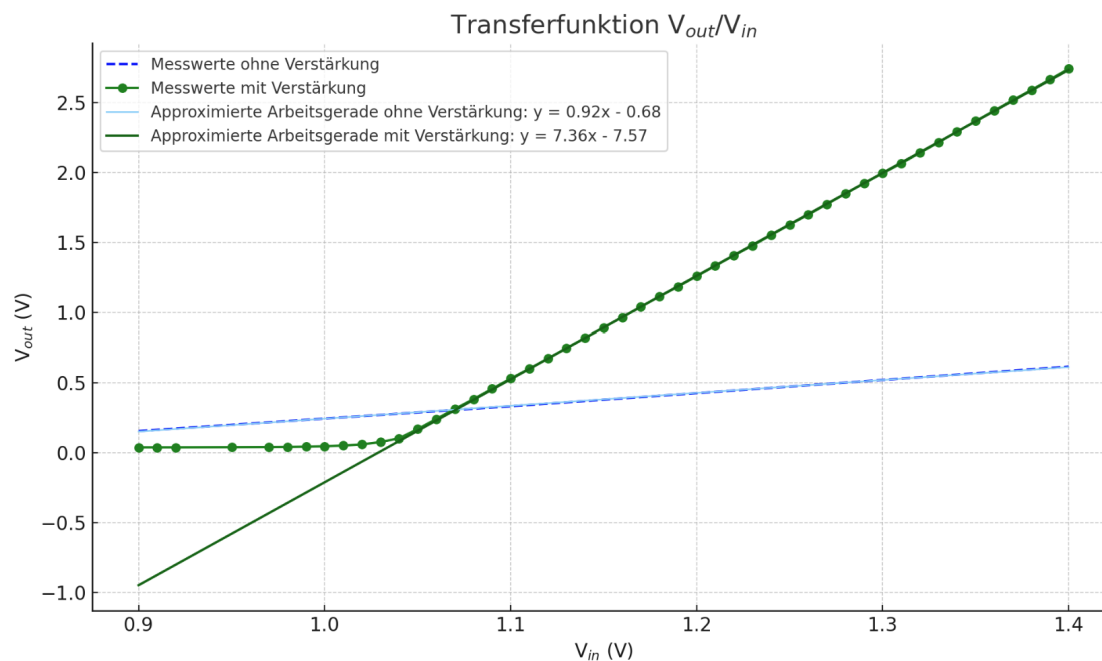


ABBILDUNG 4.4: Transferfunktion

In der Praxis bekommen wir ein Übertragungsverhältnis von 7,36. In der Theorie liegt das Verhältnis höher, etwa bei 7,8. Dies kann auf verschiedene Faktoren wie Bauteiltoleranzen, Messungenauigkeiten und Verluste zurückzuführen sein.

Bei der kaputten Platine spiegelt sich die fehlende Verstärkung schön wider, da der Übertragungsfaktor etwa bei eins liegt, leicht darunter aufgrund von Verlusten und den vorher genannten Faktoren.

Diese Messwerte sind jedoch in dieser Form noch nicht weiter verwertbar für den weiteren Verlauf des Praktikums. Wenn wir die über die Diode Q21 abfallende Spannung  $U_D$  von der gemessenen Spannung abziehen, erhalten wir die Spannung, die am Eingang

unseres Operationsverstärkers anliegt. Diese erhält man, wenn man die Spannung des DC-Arbeitspunkts, wenn kein Signal anliegt, in die Formel zur Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Eingangsspannung einsetzt. Die Ausgangsspannung  $U_{\text{out}}$  ohne Signal berechnet sich zu:

$$U_{\text{out},0} = 7,8 \cdot 0,365 \text{ V} - 2,04 \text{ V} = 0,807 \text{ V} \quad (4.4)$$

Dies liegt nahe an der in der Aufgabenstellung angenommenen Dioden-Flussspannung  $U_D = 0,8 \text{ V}$ .

Nun ziehen wir von der gemessenen Spannung  $U_{\text{in}}$  die Spannung  $U_D$  ab, um die Spannung am Eingang des Operationsverstärkers zu erhalten. Diese entspricht dem Spannungsabfall  $U_{C22}$ . Hierbei betrachten wir nur die relevanten Messwerte mit Verstärkung.

$U_{\text{in}}$ (V)	$U_{\text{out}}$ (V)	$U_{C22}$ (V)
0,9	0,039	0,093
1,0	0,047	0,193
1,03	0,077	0,223
1,06	0,242	0,253
1,1	0,531	0,293
1,2	1,258	0,393
1,3	1,994	0,493
1,4	2,741	0,593

TABELLE 4.5: Messwerte von  $U_{\text{in}}$ ,  $U_{\text{out}}$  und die am Operationsverstärker anliegende Spannung  $U_{C22}$  mit Verstärkung

Abbildung 4.5 stellt die Spannung am Operationsverstärker in Abhängigkeit der Ausgangsspannung dar.

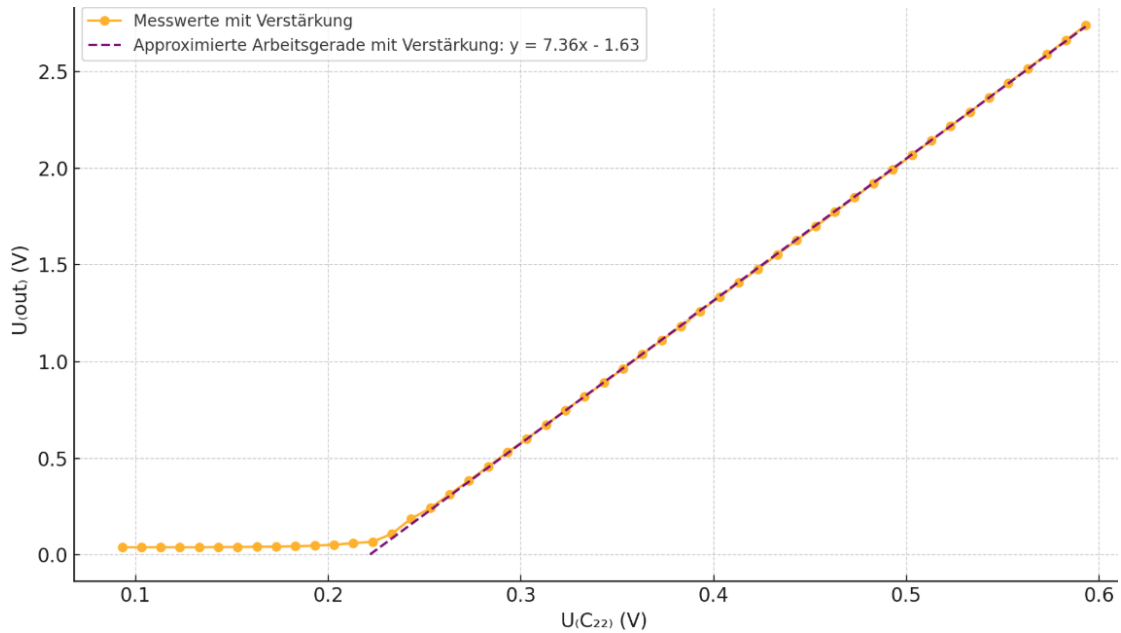


ABBILDUNG 4.5: Operationverstärker anliegende Spannung  $U_{C22}$  in Abhängigkeit der Ausgangsspannung  $U_{out}$

Bei der Approximation der Arbeitsgeraden erhält man für eine Spannung vor dem Operationsverstärker von 0V eine Spannung von  $U_{C22,0} = -1,63V$ . Das entspricht nicht exakt unserer berechneten Offsetspannung  $U_{offset}$ . Dies kann ebenfalls auf verschiedene Faktoren wie Bauteiltoleranzen, Messungenauigkeiten und Verluste zurückzuführen sein.

### 4.3 Komparatorschaltung

Zuletzt wird überprüft, ob der Komparator beim Anliegen des HF-Tones durchschaltet und somit die Übertragung der digitalen Daten funktioniert. Unsere Messwerte müssen hier nicht betrachtet werden, da der Schaltschwellwert des Komparators von  $U_{ref} = 0,79V$  nicht überschritten wird und somit der Komparator nicht schaltet. Deshalb hat es keinen weiteren Sinn, die Messung auszuwerten, da daraus keine Schlüsse gezogen werden können. Wir beziehen uns anschließend wieder auf eine Messreihe unserer Kommilitonen. In der folgenden Tabelle wird die gemessene Spannung aufgetragen, die vor dem Komparator ankommt und wie sich der Komparator verhält. Das bedeutet, welche Ausgangsspannung der Komparator in Abhängigkeit von der Eingangsspannung hat (LOW und HIGH).

<b>Eingangsspannung</b>	<b>Ausgangsspannung</b>
0,811	0,242 (LOW)
0,812	0,243 (LOW)
0,816	0,244 (LOW)
0,820	0,244 (LOW)
0,821	0,245 (LOW)
0,822	3,298 (HIGH)

TABELLE 4.6: Messwerte für Eingangsspannung und Ausgangsspannung

Anhand der Tabelle kann man erkennen, dass der Komparator für Eingangsspannungen unterhalb von 0,822 V auf LOW bleibt. Sobald die Eingangsspannung von 0,822 V überschritten wird, schaltet der Ausgang auf HIGH. Die Komparator-Schwellspannung liegt somit bei  $U_{Schwell} = 0,822V$ . Die gemessene Schaltschwelle liegt somit etwas höher als der theoretische Wert  $U_{ref} = 0,798V$  bzw. der im Schaltplan angegebene Wert von 0,79 V. Dies kann auf die zuvor genannten Faktoren zurückgeführt werden.

# Kapitel 5

## Fazit

### 5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Im Rahmen des Versuches konnten wir unser Verständnis über den Empfänger noch weiter vertiefen. Durch eine nähere Analyse des Empfängers und seiner einzelnen Komponenten, unter anderem des Downkonverters, des Operationsverstärkers und des Komparators, konnten wir die Grundlagen der Signalverarbeitung verstehen und deren praktische Anwendung nachvollziehen. Der Operationsverstärker spielt dabei durch eine geschickte Anordnung der Spannungsteiler an den Widerständen eine entscheidende Rolle bei der Verstärkung des Signals auf den gewünschten Bereich um die Schwellspannung des Komparators zu überschreiten. Der Komparator wiederum wandelt das analoge Signal in ein digitales Signal um, welches von einem Computer weiterverarbeitet werden kann. Der Einblick in die Funktionsweise des Empfängers und auch in den Einfluss der Dämpfungsglieder auf die Signalverstärkung hat uns ein besseres Verständnis für die Signalverarbeitung in der Kommunikationstechnik vermittelt.

### 5.2 Reflexion und mögliche Verbesserungen

Eine Problemquelle bei Versuch fünf war für unsere Gruppe eine defekte Platine. Dies führte zu einer nicht vorhandenen Verstärkung, sodass die Spannung am Kondensator C22 nicht den erwarteten Wert erreicht hat. Deshalb waren unsere Messreihen nicht aussagekräftig. Somit konnten wir Aufgaben nicht lösen und mussten Messreihen von Kommilitonen zu Hilfe nehmen.



# Literaturverzeichnis

- [1] Haussmann, Simon: *Schaltplan\_PCB\_V4*, 15. April 2024. Institut für Robuste Leistungshalbleitersysteme, Universität Stuttgart. Online verfügbar unter: [https://iliass3.uni-stuttgart.de/iliass.php?baseClass=ilrepositorygui&cmdNode=z5:o1&cmdClass=ilObjFileGUI&cmd=sendfile&ref\\_id=4067155](https://iliass3.uni-stuttgart.de/iliass.php?baseClass=ilrepositorygui&cmdNode=z5:o1&cmdClass=ilObjFileGUI&cmd=sendfile&ref_id=4067155) (abgerufen am 19.05.2025).
- [2] Hesselbarth, Jan: Allgemein Wissen. In: Nachrichtentechnik 1. Nachrichtentechnik 1 Skript. Online verfügbar unter: [Nachrichtentechnik1Skript](#), abgerufen am 20.05.2025.
- [3] Wikipedia: *Digital-Analog-Wandler*. Letzte Änderung am 8. Mai 2024. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Digital-Analog-Umsetzer> (abgerufen am 16.06.2025).
- [4] Wikipedia: *Verstärker (Elektrotechnik)*. Letzte Änderung am 30. April 2024. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Verst%C3%A4rker\\_\(Elektrotechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Verst%C3%A4rker_(Elektrotechnik)) (abgerufen am 18.06.2025).
- [5] Wikipedia: *Vorverstärker*. Letzte Änderung am 21. Dezember 2024. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Vorverst%C3%A4rker> (abgerufen am 30.06.2025).
- [6] Wikipedia: *Operationsverstärker*. Letzte Änderung am 11. Juni 2025. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverst%C3%A4rker> (abgerufen am 30.06.2025).
- [7] Wikipedia: *Friis-Formel*. Letzte Änderung am 3. März 2025. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Friis-Formel> (abgerufen am 30.06.2025).
- [8] Wikipedia: *Mischer (Elektronik)*. Letzte Änderung am 14. Juni 2025. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Mischer\\_\(Elektronik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Mischer_(Elektronik)) (abgerufen am 01.07.2025).

- [9] Wikipedia: *Komparator (Analogtechnik)*. Letzte Änderung am 5. September 2024. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Komparator\\_\(Analogtechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Komparator_(Analogtechnik)) (abgerufen am 02.07.2025).