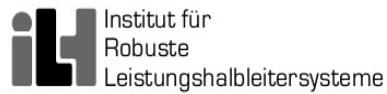




Universität Stuttgart



**Fachpraktikum (Bachelor)**  
**6G HARDWARELABOR - DESIGN UND**  
**IMPLEMENTIERUNG EINES HF TRANSCEIVERS**

---

**Versuch 6: End-to-End  
Datenübertragung**

---

**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 der Funkübertragung im Alltag . . . . .	3
1.2 Ziel des Versuches . . . . .	3
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Analyse der Transceiver-Platinen . . . . .	4
2.1.1 Funktion der Jumper . . . . .	4
2.1.2 J1 . . . . .	5
2.1.3 J2 . . . . .	5
2.1.4 Modi der Platine . . . . .	5
2.1.5 Serielles Protokoll UART . . . . .	6
2.1.5.1 Betriebsarten von UART . . . . .	8
2.2 BER . . . . .	8
2.2.1 Beispiel . . . . .	8
2.2.1.1 Matlab . . . . .	9
2.3 Pegelplanrechnung . . . . .	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 Platine A als Single-Tone Sender . . . . .	14
4.2 Platinen am Computer anschließen . . . . .	16
4.3 BER-Messung . . . . .	16
4.4 Interessante/Witzige Beobachtung . . . . .	18
4.5 Bildübertragung über Funkverbindung . . . . .	19
4.5.1 Übertragung bei sehr kurzer Funkstrecke . . . . .	19
4.5.2 Übertragung bei größerer Funkstrecke . . . . .	20
4.5.3 Abhilfemaßnahmen zur Verbesserung trotz Bitfehler . . . . .	21
<b>5 Fazit</b>	<b>22</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>22</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>HF</b>	Hochfrequenz
<b>RF</b>	Radiofrequenz
<b>6G</b>	Sixth Generation
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>OPs</b>	Operationsverstärker
<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>TX</b>	transmit
<b>RX</b>	receive

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Relevanz der Funkübertragung im Alltag

Jeden Tag nutzen wir Funkübertragungen in verschiedenen Formen, sei es durch WLAN, Bluetooth oder Mobilfunk. Diese Technologien ermöglichen es uns, Daten über große Entfernungen zu übertragen, ohne physische Verbindungen herstellen zu müssen. Die Grundlagen der Modulation sind entscheidend für die Entwicklung und Verbesserung dieser Technologien. Sixth Generation ([6G](#)) der Funkübertragung ist die neueste Generation der Funkkommunikation, die eine höhere Datenrate, geringere Latenz und verbesserte Zuverlässigkeit verspricht. Sie befindet sich aktuell in der Entwicklung. Jedoch besteht bei dem Frequenzbereich von [6G](#), beginnend mit Sub-6 GHz (unter 6 GHz) bis hin zum THz-Bereich (100 GHz - 1 THz), die Herausforderung, dass die Signale bei höheren Frequenzen stärker gedämpft werden und somit eine höhere Signalstärke erforderlich ist, um eine zuverlässige Kommunikation zu gewährleisten. Deswegen ist es einfacher, eine beispielhafte Funkübertragung bei kleineren Abständen zu dimensionieren, um das Wissen bei größeren Strecken anwenden zu können.

### 1.2 Ziel des Versuches

Das Ziel des heutigen und des letzten Versuches ist es, eine Bildübertragung über eine Funkverbindung zu realisieren und dabei die Grundlagen der Funkübertragung mithilfe von 6G zu verstehen. Dieser letzte Versuch verbindet alle bisher gelernten Grundlagen und zeigt diese in Aktion.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

### 2.1 Analyse der Transceiver-Platinen

Zur Verfügung steht eine Transceiver-Platine. Ein Transceiver ist eine Platine, die sowohl als Sender (Transmitter), als auch als Empfänger (Receiver) fungieren kann. Dafür ist diese Platine entsprechend bestückt, sodass die Funktion der Platine verändert werden kann. Hierfür stehen zwei Jumper zur Verfügung, die auf der Transceiver-Platine platziert sind. Diese können gesteckt oder abgezogen werden.

#### 2.1.1 Funktion der Jumper

Die Jumper sind in Abbildung 2.1 zu sehen.

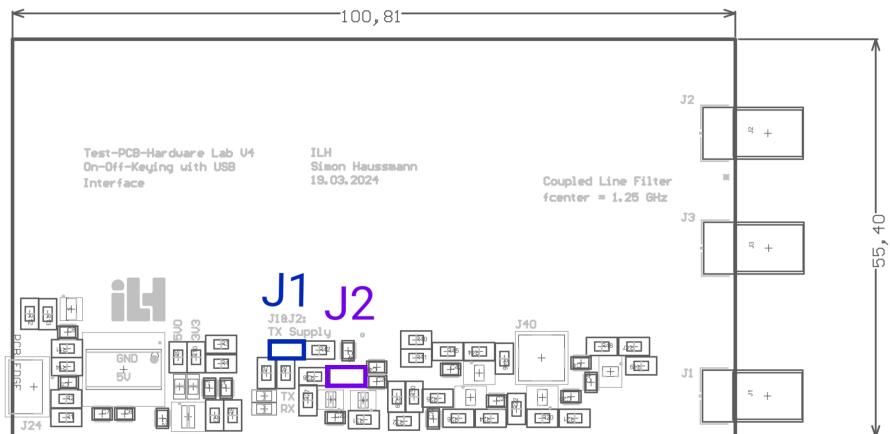


ABBILDUNG 2.1: Transceiver-Platine mit Jumpern J1 und J2. Quelle: vgl. Literaturverzeichnis [1]: Schaltpläne der Platine V4

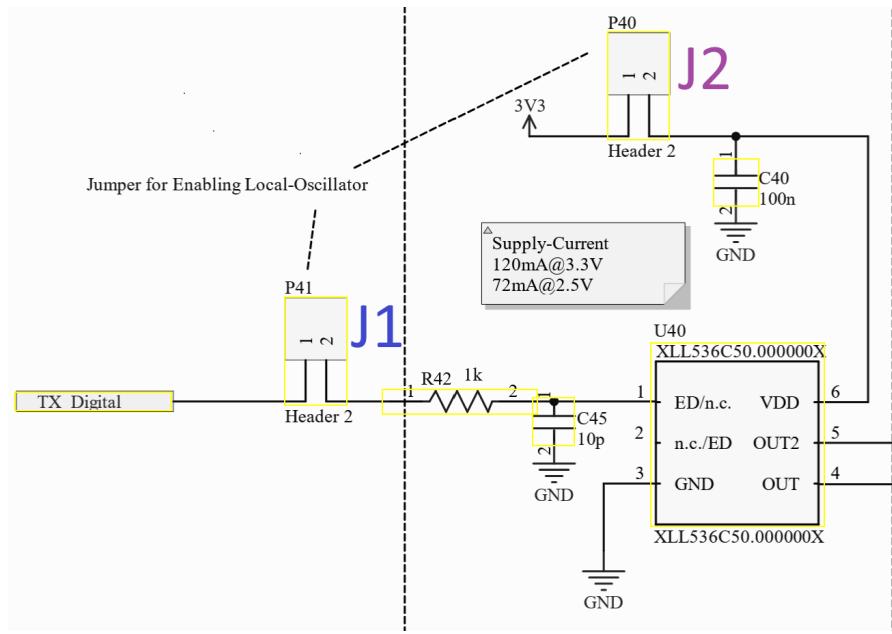


ABBILDUNG 2.2: Jumperkonfiguration

### 2.1.2 J1

Der Jumper J1 ist, wie im Schaltplan zu sehen, der Schalter, der den Oszillatoren aktiviert und deaktiviert.

### 2.1.3 J2

Der Jumper J2 ist, wie im Schaltplan zu sehen, der Schalter für die Versorgungsspannung des Oszillators.

### 2.1.4 Modi der Platine

(X steht hierbei dafür, dass der Jumper entfernt ist, ✓ dass der Jumper gesetzt ist):

J1	J2	Funktion
<span style="color:red">X</span>	<span style="color:green">✓</span>	Sender ohne Datensignal
<span style="color:green">✓</span>	<span style="color:green">✓</span>	Sender mit Datensignal(PC)
<span style="color:red">X</span>	<span style="color:red">X</span>	Empfänger

TABELLE 2.1: Spezifikationen der beiden Platinen

## 2.1.5 Serielles Protokoll UART

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) stellt ein serielles Protokoll dar, also einen Regelsatz für den Austausch von Daten zwischen zwei Geräten. Das Protokoll ist asynchron, was bedeutet, dass es kein gemeinsames Taktsignal zwischen dem Sender und dem Empfänger gibt. Stattdessen müssen beide Seiten auf dieselbe Bit- und Baudrate eingestellt sein. Zudem müssen die beiden Seiten dieselbe Rahmenstruktur und dieselben Parameter nutzen. Das UART-Protokoll ist simpel und ermöglicht die Signalübertragung in beide Richtungen zwischen Sender und Empfänger. Das Signal wird in einem vom Protokoll bestimmten Format gesendet.<sup>1</sup>

Die Kommunikation über UART kann in verschiedenen Formaten stattfinden:

- Simplex-Betrieb
- Halbduplex-Betrieb
- Voll-Duplex-Betrieb

Das Rahmenformat von UART sieht folgendermaßen aus:

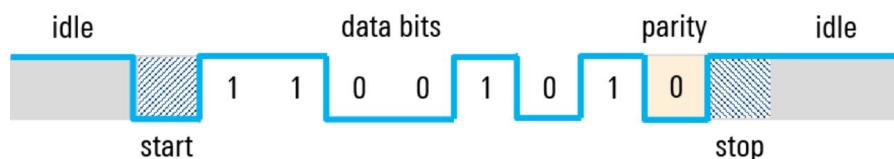


ABBILDUNG 2.3: Rahmenformat von UART. Quelle: [https://cdn.rohde-schwarz.com/image/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/essentials-digital-oscilloscopes/understanding-uart-02-infographic-rohde-schwarz\\_200\\_112521\\_1024\\_576\\_7.jpg](https://cdn.rohde-schwarz.com/image/products/test-and-measurement/essentials-test-equipment/essentials-digital-oscilloscopes/understanding-uart-02-infographic-rohde-schwarz_200_112521_1024_576_7.jpg)

---

<sup>1</sup>Vgl. Rohde & Schwarz: UART verstehen. Online: [https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen\\_254524.html](https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen_254524.html) (abgerufen am 07.07.2025).

Die Übertragung erfolgt in Form von Bytes, die aus 8 Datenbits bestehen. UART-Rahmen enthalten Start- und Stoppbits und Datenbits, die die tatsächliche Information tragen. Wie bei den meisten digitalen Systemen ist es vom UART-Protokoll festgelegt, dass der HIGH-Pegel einer logischen "1" und der LOW-Pegel einer logischen "0" entspricht. Eine spezifische Spannungsschwelle ist aus Flexibilitätsgründen durch UART nicht festgelegt, weswegen der HIGH-Pegel als "*Mark*" und der LOW-Pegel als "*Space*" beschrieben wird. Doch es ist zu beachten, dass das System beim UART-Protokoll im Ruhezustand (engl. *idle*) bei einem HIGH-Pegel liegt. Dies hat den Sinn, dass man bei einer beschädigten Leitung durch einen konstanten LOW-Pegel im Ruhezustand eine defekte Leitung/Verbindung bzw. einen defekten Sender erkennen kann.<sup>2</sup>

Der Startbit signalisiert den Beginn der Datenübertragung. Hierbei übergeht der Sender aus dem Ruhezustand (HIGH-Pegel) in den LOW-Pegel, um dem Empfänger zu signalisieren, dass die Datenübertragung beginnt. Unmittelbar danach folgen die Datenbits, die das Nutzsignal übertragen. Die Datenbits werden nacheinander gesendet, wobei eine Übertragung von 5 bis 9 Bits pro Byte erlaubt ist, jedoch eine Übertragung von 7 oder 8 Bits pro Byte am häufigsten verwendet wird. Die Reihenfolge der Datenbits wird dabei vom Sender invertiert und mit dem Least Significant Bit (LSB) zuerst gesendet. Das Most Significant Bit (MSB) wird zuletzt gesendet. Nach einer erfolgreichen Übertragung der Nutzdaten übergeht der Sender zurück in den Ruhezustand (HIGH-Pegel), um dem Empfänger zu signalisieren, dass die Übertragung abgeschlossen ist. In einigen Fällen kann es auch vorkommen, dass ein zweites (optionales) Stoppbitt konfiguriert wird, um dem Empfänger Zeit für den nächsten Übertragungsrahmen zu gewähren. Dies wird jedoch in der Praxis selten umgesetzt.<sup>3</sup>

Zuletzt sollte man noch erwähnen, dass manchmal ein Paritätsbit zur Verwendung kommt. Dieses trägt zur Fehlererkennung bei, indem es die Anzahl der gesetzten Bits (1-Bits) in einem Byte überprüft. Es gibt zwei Arten von Paritätsbits:

- Gerade Parität: Hier wird das Paritätsbit so gesetzt, dass die Gesamtanzahl der 1-Bits im Byte gerade ist.
- Ungerade Parität: Hier wird das Paritätsbit so gesetzt, dass die Gesamtanzahl der 1-Bits im Byte ungerade ist.

Das Paritätsbit kann jedoch nur ein einziges gekipptes (also falsch übertragenes) Bit erkennen, aber nicht korrigieren. Es kann auch nicht erkennen, ob zwei oder mehr Bits

---

<sup>2</sup>Vgl. Rohde & Schwarz: UART verstehen. Online: [https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen\\_254524.html](https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen_254524.html) (abgerufen am 07.07.2025).

<sup>3</sup>Vgl. Rohde & Schwarz: UART verstehen. Online: [https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen\\_254524.html](https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen_254524.html) (abgerufen am 07.07.2025).

gekippt wurden. Daher ist es in der Praxis nicht sehr verbreitet und wird oft weggelassen.<sup>4</sup>

Bei unserer tatsächlichen Schaltung liegt auch ein Standard-UART-Protokoll vor, das eine Baudrate von 115200 Baud und eine Datenübertragung von 8 Datenbits verwendet.

### 2.1.5.1 Betriebsarten von UART

Es gibt insgesamt drei Arten des Betriebs des UART-Protokolls:

1. **Simplex-Betrieb:** Die Daten werden nur in eine Richtung gesendet.
2. **Halbduplex-Betrieb:** Jede Seite sendet, aber nicht zur selben Zeit.
3. **Vollduplex-Betrieb:** Beide Seiten können gleichzeitig senden.

Im vorliegenden Versuchsaufbau liegt ein Simplex-Betrieb vor. Trotzdem muss man erwähnen, dass der Sender aufgrund der Jumperkonfiguration auch die Daten selbst empfangen kann.

## 2.2 BER

Bit Error Rate (BER) oder auf Deutsch Bitfehlerrate ist eine Angabe, die die Anzahl der falsch empfangenen Bits ins Verhältnis zu den insgesamt empfangenen Bits setzt.

$$BER = \frac{N_{\text{Anzahl fehlerhaft empfangener Bits}}}{N_{\text{Anzahl empfangener Bits}}} \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Beispiel

Wir betrachten ein Beispiel: Folgende Sequenz wird gesendet:

$$10111001 \quad (2.2)$$

Empfangen wurde aber:

$$10010011 \quad (2.3)$$

Es ist schnell zu erkennen, dass hier drei Bits falsch empfangen wurden. Die Bitfehlerrate beträgt in diesem Fall:

$$BER = \frac{3}{8} = 0,375 \quad (2.4)$$

---

<sup>4</sup>Vgl. ebenda

### 2.2.1.1 Matlab

```
%Generierung eines zufälligen Bytes
data_A = randi(255);
% Senden des Zufälligen Bytes in Transceiver A:
write(serial_A,data_A,"uint8");
data_A = dec2bin(data_A,8);

%Auslesen der empfangenen Daten:
rec_A_fb = dec2bin(read(serial_B,1,"uint8"),8);
rec_B = dec2bin(read(serial_B,1,"uint8"),8);
```

ABBILDUNG 2.4: Senden/Empfangen

In diesem Code wird zuerst eine Zufallszahl erzeugt, die bis 255 geht. Um diese in binärer Form darzustellen, werden 8 Bit benötigt.

Nachdem die Daten gesendet wurden, werden sie vom Empfänger und auch Sender eingelesen. Danach werden sie in die Variable rec\_A\_fb für den Sender selbst und rec\_B für den Empfänger gespeichert.

Nun wird genauer betrachtet, wie die Bitfehlerrate berechnet wird:

```
for index = 1:8
    if isempty(rec_A_fb)
        err_cnt_A_fb = err_cnt_A_fb + 1;
    elseif ~strcmp(rec_A_fb(index), data_A(index))
        err_cnt_A_fb = err_cnt_A_fb + 1;
    end
    if isempty(rec_B)
        err_cnt_B = err_cnt_B + 1;
    elseif ~strcmp(rec_B(index), data_A(index))
        err_cnt_B = err_cnt_B + 1;
    end
```

ABBILDUNG 2.5: Bitfehlerrate-Berechnung

Wir iterieren über jedes Bit, also insgesamt acht Mal. Die Fehleranzahl wird in err\_cnt\_A\_fb und err\_cnt\_B gespeichert. Konnten gar keine Daten empfangen werden, wird der jeweilige Counter auf 8 hochgezählt. Der zentrale Part ist das bitweise Vergleichen der gesendeten und empfangenen Daten. Stimmen diese nicht überein, wird ebenfalls der Error-Counter hochgezählt. Zum Schluss wird die BER berechnet und ausgegeben. Um die Genauigkeit zu erhöhen, wird das mehrfach wiederholt, ebenso wird auch der Sender und Empfänger vertauscht. Das wurde hier der Übersichtlichkeit und Symmetrie halber nicht genauer betrachtet.

## 2.3 Pegelplanrechnung

Das Ziel der Pegelplanrechnung ist, den Abstand zu berechnen, der noch reicht, um die Daten zu empfangen. Das heißt, am Ende der Empfängererkette muss ein stark genuges Signal ankommen, dass der Komparator schalten kann. Dafür wird die Schaltung von hinten nach vorne analysiert, um herauszufinden, welche Leistung am Empfänger anliegen muss, damit der Komparator schaltet.

Aus Versuch fünf ist die Komparator-Schwellspannung, die bei etwa  $U_{\text{Schwell}} = 0,822 \text{ V}$  liegt, bekannt.

Als Nächstes können wir mithilfe der Analogverstärker-Kennlinie bzw. der Übertragungsfunktion die Spannung am Kondensator C22 berechnen. Wenn wir ein Ausgangssignal von  $U_{\text{out}} = 0,822 \text{ V}$  annehmen, können wir die Eingangsspannung  $U_{\text{in}}$  berechnen. Die Übertragungsfunktion  $\frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{C22}}$  lautet wie folgt (im linearen Bereich):

$$U_{\text{out}} = 7,36 \cdot U_{C22} - 1,63 \text{ V} \quad (2.5)$$

Aufgelöst nach  $U_{C22}$  ergibt sich:

$$U_{C22} = \frac{U_{\text{out}} + 1,63 \text{ V}}{7,36} = \frac{0,822 \text{ V} + 1,63 \text{ V}}{7,36} = 0,333 \text{ V} \quad (2.6)$$

Die Formel der Sensitivität aus Versuch fünf:

$$U_{C22} = k \cdot \sqrt{P_{\text{in}}} - U_{\text{offset}} \quad (2.7)$$

Umgestellt nach  $P_{\text{in}}$  ergibt sich:

$$P_{\text{in}} = \left( \frac{U_{C22} + U_{\text{offset}}}{k} \right)^2 \quad (2.8)$$

Mit den empirisch bestimmten Werten und dem vorher berechneten Wert für  $U_{C22}$  ergibt sich:

$$P_{\text{min}} = 10 \cdot \log \left( \left( \frac{0,333 \text{ V} + 0,36827 \text{ V}}{9,72 \frac{\text{V}}{\sqrt{\text{mW}}}} \right)^2 \right) = -22,84 \text{ dBm} \quad (2.9)$$

Somit wissen wir nun, welche Leistung am Eingang des Empfängers anliegen muss, damit ein gesendetes Signal auch empfangen werden kann. Jetzt berechnen wir den Path-Loss, den wir maximal haben dürfen, um danach die maximale Reichweite zu ermitteln. Die maximale Freiraumdämpfung (Path-Loss) wird mit folgender Formel berechnet:

$$D_{\text{Path}} = P_{\text{TXGemessen}} + D_{\text{Kabel}} + G_{\text{TXAntenna}} + G_{\text{RXAntenna}} - P_{\text{RXMin}} \quad (2.10)$$

$$D_{\text{Path}} = -7,7 \text{ dBm} + 0,45 \text{ dB} - 0,51 \text{ dBi} - 0,51 \text{ dBi} - (-22,84 \text{ dBm}) = 14,57 \text{ dB} \quad (2.11)$$

$$D_{\text{Path}} = 20 \cdot \log \left( \frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.12)$$

Umgestellt nach  $d$  ergibt sich:

$$d = \frac{c}{4\pi f} \cdot 10^{\frac{D_{\text{Path}}}{20}} = 0,102 \text{ m} \quad (2.13)$$

Somit erhalten wir eine maximale Reichweite von  $d = 0,102 \text{ m}$ . Der Abstand müsste etwas kleiner sein, damit der Komparator schaltet, sonst liegt man exakt auf der Schwellspannung. In der Realität hatten wir eine maximale gesicherte Funkreichweite von  $d_{\text{TR,max}} = 8 \text{ cm}$ . Teilweise konnte sogar eine Reichweite von 9 cm erzielt werden. Die kleine Abweichung zum berechneten Wert ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, wie z.B. die Ungenauigkeit der approximierten Funktionen, Messungenauigkeiten und zusätzliche Übertragungsfehler. In der Realität hatten wir eine maximale gesicherte Funkreichweite von  $d_{\text{TR,max}} = 8 \text{ cm}$ . Teilweise konnte sogar eine Reichweite von 9 cm erzielt werden. Die kleine Abweichung zum berechneten Wert ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, wie z.B. die Ungenauigkeit der approximierten Funktionen, Messungenauigkeiten und zusätzliche Übertragungsfehler.

# Kapitel 3

## Versuchsaufbau

### 3.1 Verwendete Geräte

Im Versuch werden folgende Geräte verwendet:

- **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.
- **2 × Antennen AN\_Master\_003\_2-SMA:** Antennen zum Aufbau einer Funkverbindung.
- **Rechner mit der Anwendung „HTerm (HyperTerminal)“:** Zur Steuerung der Sendeplatine und ggf. zum Empfang der Daten von der Empfängerplatine.

### 3.2 Messaufbau

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

1. Zuerst werden sowohl die Sendeplatine als auch die Empfängerplatine an einen PC mittels USB-Port angeschlossen, um beide zu aktivieren.
2. Die Jumper J1 und J2 (P40 und P41) werden entsprechend gesteckt, damit eine der Platinen als Sender und die andere als Empfänger fungiert.

3. Zuerst wird ein Single-Tone verschickt um die Reichweite zu testen.
4. Es wird mehrmals eine Bitfolge vom PC mittels Funkverbindung von einer Platine zur anderen gesendet. Dies wird in HTerm an beiden PCs durchgeführt.
5. Zum Schluss wird auch ein Bild mehrmals vom Sender zum Empfänger geschickt, um dabei die Abstände und die Sendequalität zu prüfen.

# Kapitel 4

## Praktische Durchführung

### 4.1 Platine A als Single-Tone Sender

Für den ersten Teil des Versuchs werden zwei identische Transceiver-Platinen verwendet, die bereits im Verlauf dieses Praktikums genauer betrachtet wurden. Die beiden Platinen haben folgende Spezifikationen:

	J1	J2	Funktion
Platine A	X	✓	Sender
Platine B	X	X	Empfänger

TABELLE 4.1: Spezifikationen der beiden Platinen

Die folgenden Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen auf der linken Seite die Platine A als Sender und auf der rechten Seite die Platine B als Empfänger. Die äußeren Lampen am USB-Port leuchten bei Stromversorgung. Befinden sich Sender und Empfänger innerhalb der Funkreichweite, so leuchtet weder die Lampe TX (engl. transmitting: senden) noch die Lampe RX (engl. receiving: empfangen) am Sender und Empfänger. Ist die Funkreichweite überschritten, so leuchtet die Lampe RX am Empfänger, die Lampe TX leuchtet nicht. Der Sender bleibt unverändert.



ABBILDUNG 4.1: Sender und Empfänger innerhalb der Funkreichweite



ABBILDUNG 4.2: Sender und Empfänger außerhalb der Funkreichweite

Nun betrachten wir die Funkreichweite der Platinen genauer. Diese Messung führen wir auf zwei unterschiedliche Arten durch. Einmal wird der Abstand der beiden Antennen innerhalb der Funkreichweite erhöht, bis der Kontakt abbricht. Dann wird der Abstand der Antennen außerhalb der Funkreichweite verringert, bis der Kontakt wieder hergestellt ist. Zuerst wurde eine Funkreichweite von  $d_{TR,1} = 9\text{ cm}$  gemessen. Auf die zweite Art wurde eine Funkreichweite von  $d_{TR,2} = 8\text{ cm}$  gemessen. Dies kann auf das Schwellverhalten des Empfängers (Hysterese-Effekt) zurückzuführen sein. Ein schwaches Signal kann noch von der Platine B empfangen werden, wobei die Verbindung unzureichend ist, um initial erkannt zu werden.

Die maximale Funkreichweite der Platinen, um Signale sicher auszuwerten, beträgt somit  $d_{TR,max} = 8\text{ cm}$ .

Nun wird der Versuch wiederholt, jedoch wird die Funktion der Platinen getauscht. Wie zu erwarten, ist das Ergebnis im Rahmen der Messungenauigkeit identisch. Die Funkreichweite beträgt ebenfalls  $d_{TR,1} = 9\text{ cm}$  und  $d_{TR,2} = 8\text{ cm}$  und hat somit ebenfalls eine maximale Funkreichweite der Platinen, um sicher Signale auszuwerten, von  $d_{TR,max} = 8\text{ cm}$ .

## 4.2 Platinen am Computer anschließen

Nun wurde eine Platine an den Computer angeschlossen und die andere Platine an den Laptop. Mithilfe von Hterm werden Daten in Form von ASCII-Zeichen von der einen Platine an die andere gesendet und mit Hterm wieder ausgelesen. Wichtig in dieser Prozedur war das Verbinden beider Jumper an der Sender-Platine und das Entfernen beider Jumper an der Empfänger-Platine. Wären die Jumper bei der Empfänger-Platine verbunden gewesen, wäre das Problem gewesen, dass die Platine auch ein Signal gesendet hätte und dieses auch wieder empfangen hätte, was unerwünscht ist. In der Praxis konnten wir mit diesem Setup eine nutzbare Reichweite von etwa 7,5 cm erreichen.

	J1	J2	Funktion
Platine A	✓	✓	Sender
Platine B	X	X	Empfänger

TABELLE 4.2: Spezifikationen der beiden Platinen

## 4.3 BER-Messung

Jetzt wird das zur Verfügung gestellte Matlab-Skript `BER_Measurement.m` genutzt, um eine Bit-Error-Analyse der Verbindung durchzuführen. Zuerst werden die Platinen so ausgerichtet, dass sich die Antennen parallel zueinander befinden und sich berühren. Aus dieser Position heraus wird die Übertragungsstrecke schrittweise in 1-cm-Schritten inkrementiert und die BER dokumentiert.

Abstand [cm]	BER A → B
0	0.00
1	0.00
2	0.64
3	1.00
4	1.00
5	1.00
6	1.00

TABELLE 4.3: Übertragung mit Platine A als Sender und Platine B als Empfänger

In der Messreihe Tabelle 4.3 wurde die Platine A als Sender und Platine B als Empfänger konfiguriert. Es ist zu erkennen, dass die BER für einen Abstand von 0–1 cm null ist. Im nächsten Zentimeter steigt sie auf 0,64 an und ist bereits 1 cm später auf 1,00 angestiegen. Das bedeutet eine hundertprozentige Fehlerbitrate.

Nun wurde die Funktion der Platinen getauscht, sodass Platine B als Sender und Platine A als Empfänger fungiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 zu sehen.

Abstand [cm]	BER B → A
0	0.00
1	0.00
2	0.00
3	0.00
4	0.03
5	1.00
6	1.00

TABELLE 4.4: Übertragung mit Platine B als Sender und Platine A als Empfänger

Hier ist der Bitfehler bis zu einem Abstand von 3 cm null. Er steigt bei 4 cm auf 0,03 an und ist danach auf hundert Prozent angestiegen.

Zum besseren Vergleich sind die Messwerte zusätzlich in Abbildung 4.3 grafisch dargestellt.

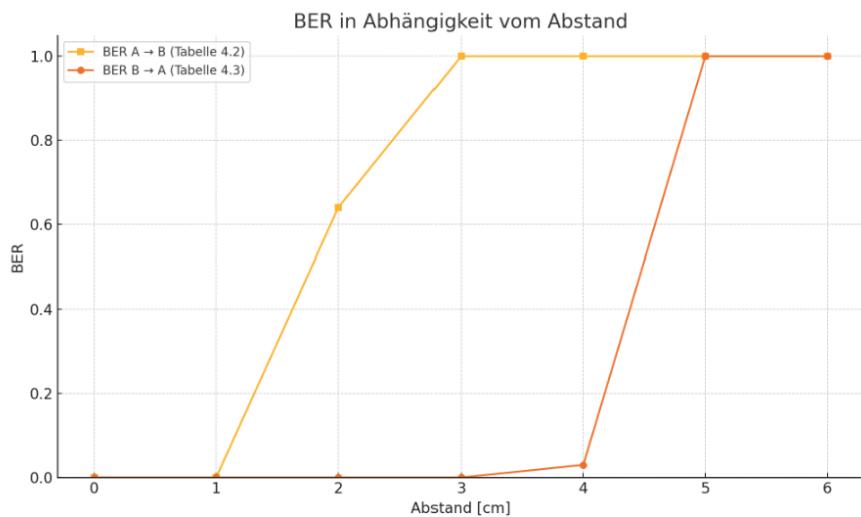


ABBILDUNG 4.3: Vergleich BER-Messung der Platinen

Der BER von der Empfänger- zur Senderplatine wird ebenfalls aufgezeichnet. Dieser ist jedoch immer ein hundertprozentiger Fehler. Man kann erkennen, dass beide Platinen alles andere als optimal für die Datenübertragung sind und dass sie auch untereinander

erhebliche Unterschiede aufweisen. Die Konfiguration mit Platine B als Sender und A als Empfänger erreicht jedoch das bestmögliche Ergebnis.

#### 4.4 Interessante/Witzige Beobachtung

Als wir die Messung von Task 4 durchgeführt haben und dann bei größeren Entfernungen kein Signal mehr erfasst hatten, haben wir aus Spaß einen Samsung-Pen auf beide Antennen gelegt und auf einmal konnten wir wieder Signale empfangen. Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass der Samsung-Pen metallische Bestandteile enthält, die die EM-Welle besser leiten als Luft.

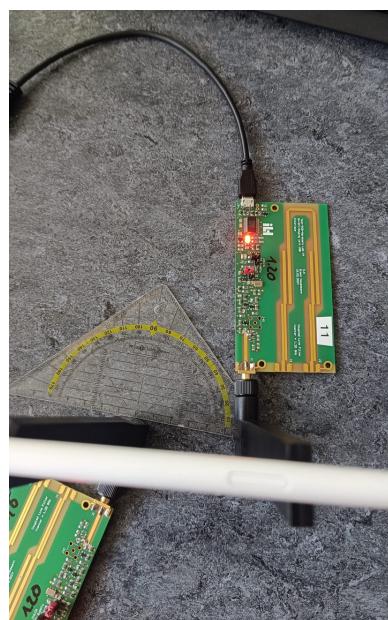


ABBILDUNG 4.4: Samsung Pen auf Antenne

## 4.5 Bildübertragung über Funkverbindung

Zu guter Letzt wird eine Bildübertragung über eine sehr kurze Funkstrecke durchgeführt.  
Das folgende Originalbild wird hierbei übertragen:



ABBILDUNG 4.5: Das zu übertragende Originalbild

Unser Verwendetes Bild hat das Format .png. Dessen ASCII Zeichen ansammlung wird wie zuvor nacheinander übertragen.

#### 4.5.1 Übertragung bei sehr kurzer Funkstrecke

Ein Ausschnitt aus der Sammlung der ASCII-Zeichen, die übertragen wurden, ist in Abbildung 4.6 zu sehen.

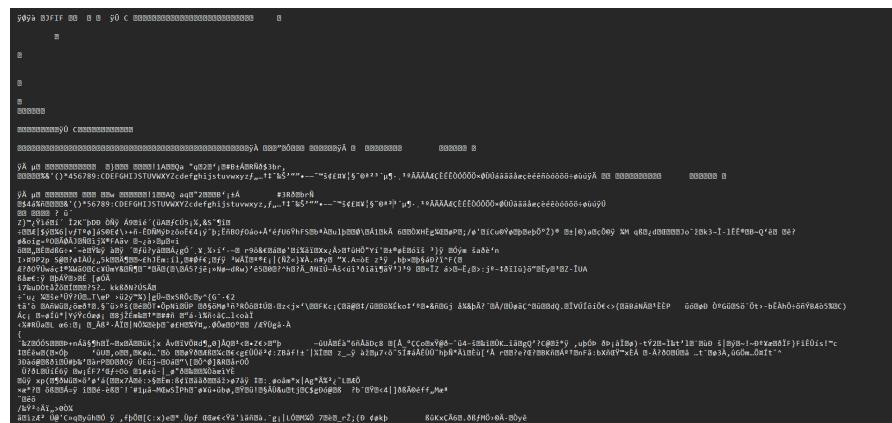


ABBILDUNG 4.6: Das übertragene Bild in ASCII-Darstellung

In dem Format ist die Datei für den Menschen nicht lesbar, da sie aus einer Vielzahl von Zeichen besteht, die nicht direkt interpretiert werden können. Die Änderung der Dateierweiterung in .png stellt sicher, dass das Bild tatsächlich als ein Bild dargestellt wird.

Die Datei lässt sich hierbei bei einer sehr kurzen Funkstrecke problemlos öffnen, was davon überzeugt, dass die Fehlerbitrate bei einer geringen bzw. gar nicht vorhandenen Distanz zwischen Sender und Empfänger sehr gering ist.

#### 4.5.2 Übertragung bei größerer Funkstrecke

Wird jetzt aber eine längere Funkstrecke zwischen Sender und Empfänger gewählt, so ändert sich das Verhalten der Übertragung.

Es stellte sich in der Praxis heraus, dass die Übertragungsqualität bei einer größeren Funkstrecke deutlich abnimmt.

In Abbildung 4.7 sind die Bilder zu sehen, die mit kleiner werdender Funkstrecke übertragen wurden.

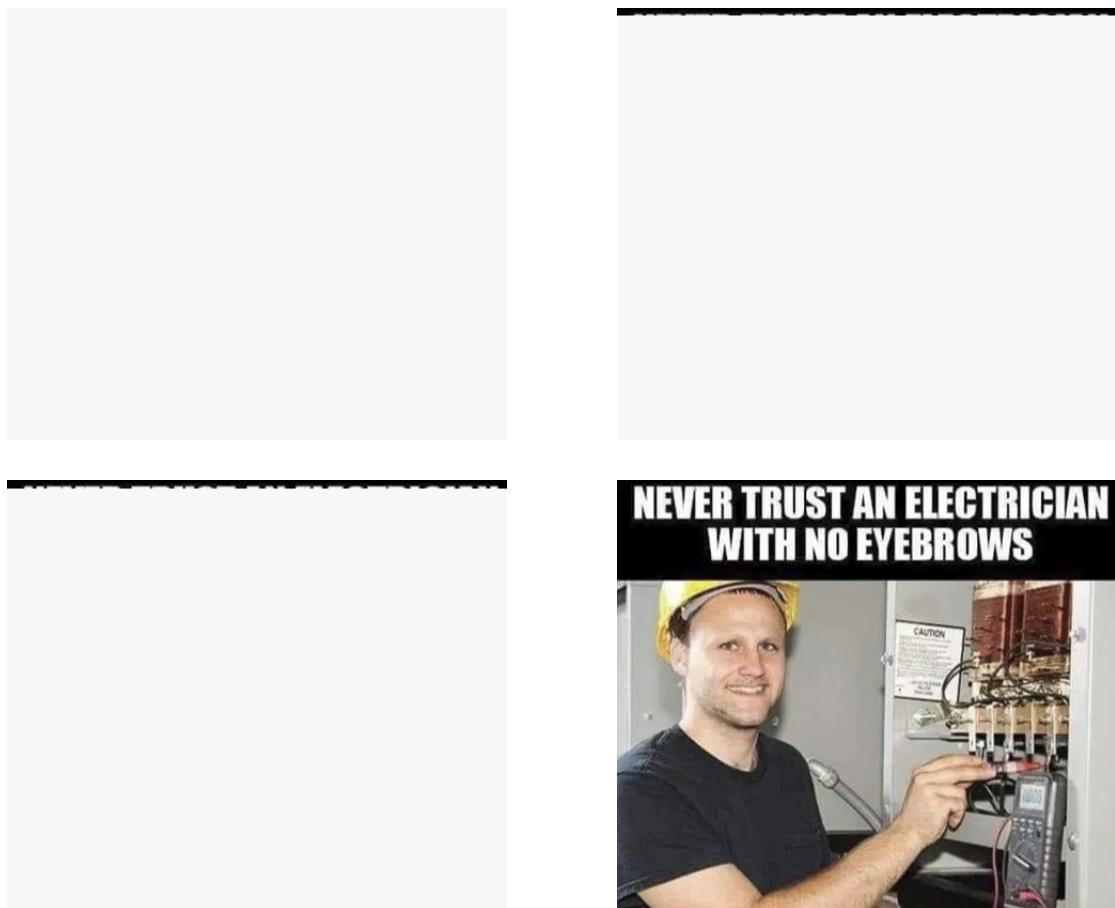


ABBILDUNG 4.7: Das übertragene Bild bei verschiedenen Funkstrecken

Man sieht deutlich, dass die Übertragung bei größerer Funkstrecke zu Störungen führt, die sich in Form von fehlenden Pixeln im Bild äußern. In der Praxis war die Änderung des Abstands im Bild 4 relativ zu Bild 3 vergleichsweise klein, hatte jedoch eine massive Verbesserung der Übertragungsqualität zur Folge.

Da auf den oberen Bildern bei weiterer Entfernung fast nix mehr zu sehen ist, selbst nach mehrfachen Wiederholungen. Haben wir während die Platine gesendet hat, kurz die Entfernung erhöht und wieder verringert. Das Ergebnis der Bildübertragung ist dann das folgende:

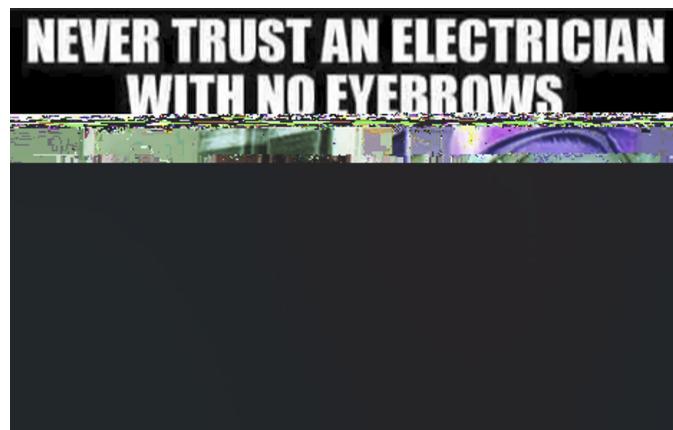


ABBILDUNG 4.8: Das übertragene Bild in ASCII bei bewegten Platinen

#### 4.5.3 Abhilfemaßnahmen zur Verbesserung trotz Bitfehler

Eine Möglichkeit zur besseren Signalübertragung wäre MIMO (Multiple Input Multiple Output). MIMO nutzt mehrere Antennen zur Datenübertragung und -empfang. Dadurch wird eine erhöhte Diversität des Signals und somit eine höhere Robustheit gegenüber Fehlern erreicht.<sup>1</sup>

Die zweite Möglichkeit wäre es, dieselbe Information mehrfach zu senden (zeitlich oder räumlich). Der Empfänger kombiniert die Signale und stellt somit eine robuste Decodierung sicher.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Vgl. Wikipedia. Online:[https://de.wikipedia.org/wiki/MIMO\\_\(Nachrichtentechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/MIMO_(Nachrichtentechnik)) (abgerufen am 08.07.2025).

<sup>2</sup>Vgl. Diversity scheme. In: Wikipedia. Online:[https://en.wikipedia.org/wiki/Diversity\\_scheme?utm\\_source=chatgpt.com](https://en.wikipedia.org/wiki/Diversity_scheme?utm_source=chatgpt.com) (abgerufen am 08.07.2025)

# Kapitel 5

## Fazit

Man könnte sagen, dieser Versuch war die Krönung unseres Praktikums. Auf einmal haben wir alle Komponenten, die wir über die letzte Zeit kennengelernt haben, in einem Versuch vereinigt. Nun erkennt man, dass z.B. der LNA, der am Anfang so aufwendig berechnet und simuliert wurde, seine Daseinsberechtigung hat. Ebenso alle anderen Komponenten, die in ihrer Gesamtheit unerlässlich für eine erfolgreiche Funkübertragung sind. Es war auch interessant zu sehen, dass die am Anfang wenig beachteten Jumper in der Lage waren, die Funktionalität unserer Platine zu ändern. Somit konnten wir mit zwei Transceivern ein Funksystem aufbauen, welches uns ermöglichte, eine Funkverbindung herzustellen, mit der man Bilder übertragen konnte. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Praktikum trotz zahlreicher Probleme und viel Schweiß und Tränen uns ein weitaus besseres Verständnis für die Nachrichtentechnik vermittelt hat. Uns wurden die Herausforderungen bewusst, die der fortwährenden Verbesserung der 6G-Technologie unterliegen, um dem Nutzer das bestmögliche Ergebnis zu ermöglichen.

# Literaturverzeichnis

- [1] Haussmann, Simon: *Schaltplan\_PCB\_V4*, 15. April 2024. 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](https://ilias3.uni-stuttgart.de/ilias.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: *Friis-Formel*. Letzte Änderung am 3. März 2025. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Friis-Formel> (abgerufen am 30.06.2025).
- [4] Rohde & Schwarz: *UART verstehen*. Online verfügbar unter: [https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen\\_254524.html](https://www.rohde-schwarz.com/de/produkte/messtechnik/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/uart-verstehen_254524.html) (abgerufen am 07.07.2025).
- [5] Wikipedia: *Bit Error Rate*. Letzte Änderung am 27. Juni 2025. Online verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bit\\_error\\_rate](https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate) (abgerufen am 08.07.2025).
- [6] Wikipedia: *MIMO (Nachrichtentechnik)*. Letzte Änderung am 16. Januar 2025. Online verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/MIMO\\_\(Nachrichtentechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/MIMO_(Nachrichtentechnik)) (abgerufen am 08.07.2025).
- [7] Wikipedia: *Diversity Scheme*. Letzte Änderung am 19. September 2024. Online verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Diversity\\_scheme](https://en.wikipedia.org/wiki/Diversity_scheme) (abgerufen am 08.07.2025).
- [8] Maswell: *Antenne\_SMA\_AN\_Master\_003\_2\_SMA*, o. D.. Suzhou Maswell Communication Technology Co. Ltd. Online verfügbar unter: <https://ilias3.uni-stuttgart.de/ilias.php?baseClass=ilrepositorygui&cmdNode=z5:>

[o1&cmdClass=ilObjFileGUI&cmd=sendfile&ref\\_id=4067154](#) (abgerufen am 09.07.2025).