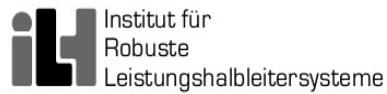




Universität Stuttgart



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

**Versuch 4: Modulierte Daten,
Modulation, Demodulation und
Trägerfrequenz**

Protokollführer

Lukas Müller

Erik Zimmermann

Farhad Valizada

Betreuer

Simon Haussmann

Eingereicht am

21. Juni 2025

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
1.1 Ziel des Versuchs	4
1.2 Einführung in die Modulation von Daten	4
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Modulationsarten	5
2.1.1 Amplitudenmodulation	5
2.1.1.1 Analoge Amplitudenmodulation AM	5
2.1.1.2 Digitale Amplitudenmodulation ASK	6
2.1.2 Frequenzmodulation FM	6
2.1.3 Phasenmodulation PM	7
2.2 Blockdiagramm einer Sendestrecke	7
2.2.1 DAC	8
2.2.2 LO und Mischer	9
2.2.3 PA	10
2.2.4 Drahtlose Übertragung mit Antennen	10
2.2.5 LNA	10
2.2.6 Demodulation	11
2.2.7 ADC	12
2.2.7.1 Analogverstärker	13
2.2.7.2 Komparator	13
2.3 Mathematische Grundlagen: Fourier-Transformation	14
2.3.1 Betrag und zeitlicher Verlauf von Rechteckfunktion	14
2.3.2 Betrag und zeitlicher Verlauf von Sinusfunktion	15
2.3.3 Multiplikation der beiden Funktionen im Zeitbereich	16
3 Versuchsaufbau	18
3.1 Verwendete Geräte und Materialien	18
3.2 Versuchsaufbau	19
4 Durchführung	20
4.1 Durchführung der Spektrumanalyse	20
4.2 Sender mit und ohne Datenübertragung	20
4.2.1 Messung ohne Datenübertragung	20
4.2.2 Messung mit Datenübertragung	21
4.3 Vergleich mit den theoretischen Reflexionen	23

5 Fazit	24
5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	24
Literaturverzeichnis	25

Abkürzungsverzeichnis

ADS	Advanced Design System
AM	Analoge Amplitudenmodulation
ASK	Digitale Amplitudenmodulation
FM	Frequenzmodulation
PM	Phasenmodulation
HF	Hochfrequenz
6G	Sixth Generation
SMA	SubMiniature version A
PCB	Printed Circuit Board
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
PA	Power Amplifier
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

Beim Versuch 4 des Fachpraktikums 6G Hardwarelabor geht es um die Grundlagen der Modulation von Daten. Zuerst wird eine Einführung in die Modulation gegeben, gefolgt von der Erklärung der verschiedenen Arten der Modulation. Nach einigen theoretischen Grundlagen zur Modulation werden diese in der Praxis umgesetzt.

1.2 Einführung in die Modulation von Daten

Vorweg sollte jedoch die Definition der Modulation erklärt werden, da sie für das Verständnis des Versuchs von Bedeutung ist. Die Modulation in der Kommunikationstechnik ist ein Verfahren, bei dem eine Eigenschaft einer Trägerfrequenz systematisch variiert wird, um Informationen (Nutzsignal) zu übertragen. Dabei wird das Nutzsignal auf die Trägerfrequenz aufmoduliert, um es über größere Entfernungen zu übertragen. Auf die Arten der Modulation wird im Verlauf des Versuchs genauer eingegangen.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Modulationsarten

Modulationsverfahren sind ein großes Anwendungsgebiet in der Nachrichtentechnik. Ziel ist es, viele Informationen verlustfrei zu übertragen. Möchte man ein Datensignal übertragen, muss es davor aufbereitet werden. Dies erledigt der Modulator/Mischer. Es gibt analoge und digitale Modulationsarten. Es folgen einige Beispiele:

2.1.1 Amplitudenmodulation

2.1.1.1 Analoge Amplitudenmodulation AM

Die Idee hinter der Amplitudenmodulation ist, dass das Informationssignal auf die Amplitude des Trägersignals moduliert wird. Dadurch verändert sich die Amplitude des Trägersignals in Abhängigkeit vom Pegel und der Frequenz des Informationssignals.

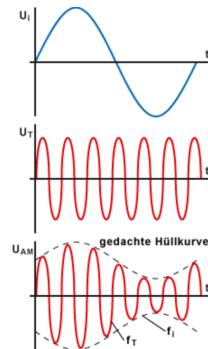


ABBILDUNG 2.1: Amplitudenmodulation

Quelle: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0401181.htm>

Die Amplitude der Trägerschwingung wird durch das analoge Datensignal $x(t)$ folgendermaßen verändert:

$$a(t) = A_c(1 + \mu x(t)) \quad (2.1)$$

Das AM-Signal wird beschrieben durch:

$$x_c(t) = A_c(1 + \mu x(t)) \cos(2\pi f_c t) \quad (2.2)$$

- A_c : Trägeramplitude
- f_c : Trägerfrequenz
- μ : Modulationsindex $0 < \mu < 1$

2.1.1.2 Digitale Amplitudenmodulation ASK

Einer der einfachsten digitalen Modulationsverfahren ist das On-Off-Keying. Die Idee ist ganz simpel: Man hat ein digitales Datensignal aus Nullen und Einsen und ein Sinus-/Kosinus-Signal von einem Oszillator, das als Trägerfrequenz fungiert. Und je nachdem, ob eine Null oder Eins anliegt, wird dann der Oszillator angeschaltet bzw. ausgeschaltet. Mathematisch ausgedrückt heißt das:

$$s(t) = \begin{cases} 0, & \text{für Bit } = 0 \\ A \cdot \cos(2\pi f_c t), & \text{für Bit } = 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

2.1.2 Frequenzmodulation FM

Die Frequenzmodulation spielt eine ebenso wichtige Rolle wie die Amplitudenmodulation, ist im Vergleich jedoch weniger störanfällig. Hier wird auch ein hochfrequentes Trägersignal erzeugt und dadurch die Sendefrequenz um einen kleinen Betrag verändert. Am einfachsten ist so eine Modulation durch einen LC-Schwingkreis.

$$x_c(t) = A_c \cos \left(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_0^t x(\tau) d\tau \right) \quad (2.4)$$

- $x(\tau)$: Datensignal
- A_c : Amplitude des Trägersignals (konstant)
- f_c : Trägerfrequenz
- f_Δ : Frequenzhub, legt die maximale Abweichung zu f_c fest

2.1.3 Phasenmodulation PM

Die Phasenmodulation gehört wie die Frequenzmodulation zu den Winkelmodulationen. Hier wird die Phase der Trägerwelle in Abhängigkeit vom Datensignal verändert. Die Phasenveränderung bleibt im Signal erhalten, variiert jedoch im Vergleich zur ursprünglichen Phase des Trägersignals.

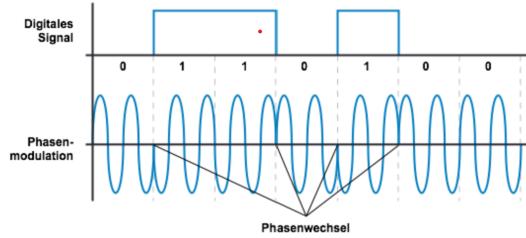


ABBILDUNG 2.2: Phasenmodulation
Quelle: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0402021.htm>

2.2 Blockdiagramm einer Sendestrecke

Im folgenden Abschnitt wird die Hochfrequenz-Übertragungsstrecke eines typischen Funksystems beschrieben. Bei Abbildung 2.3 handelt es sich um ein Blockdiagramm. Es zielt darauf ab, ein grundlegendes systematisches Verständnis aufzubauen, um das Gelernte auf unsere spezifische Hardware anwenden zu können. Die einzelnen Komponenten der Hochfrequenz-Übertragungsstrecke und deren Zusammenspiel werden im Anschluss näher erläutert und auf ihre Realisierung in unserer Hardware eingegangen.

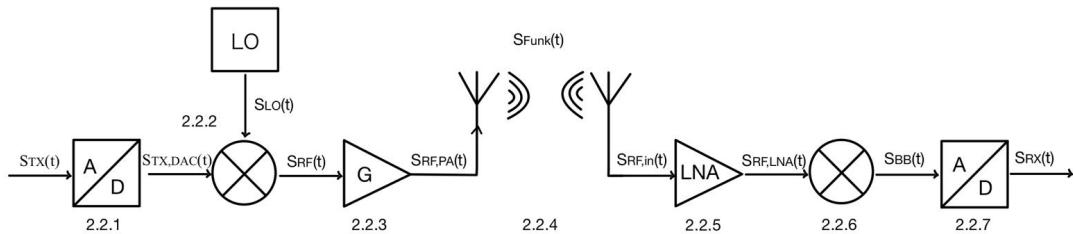


ABBILDUNG 2.3: Blockdiagramm einer typischen Hochfrequenz-Übertragungsstrecke

Blockdiagramm-Komponente	Beschreibung
2.2.1 Digital-Analog-Wandler (DAC)	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{TX}(t)$: Digital erzeugtes Sendesignal
2.2.2 Lokaler Oszillator (LO)	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{TX,DAC}(t)$: Analoges Signal (Basisbandsignal)
2.2.2 Mischer: Modulator	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{LO}(t)$: Sinusförmiges Trägersignal/ ungedämpfte hochfrequente Trägerschwingung
2.2.3 Leistungsverstärker (PA)	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{RF}(t)$: moduliertes analoges Hochfrequenzsignal
2.2.4 Sende- und Empfangsantenne	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{RF,PA}(t)$: Verstärkte Hochfrequenzsignal (durch PA)
2.2.5 Low Noise Amplifier (LNA)	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{Funk}(t)$: Signal auf Funkstrecke
2.2.6 Mischer: Demodulator	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{RF,in}(t)$: Schwaches, empfangene Hochfrequenzsignal
2.2.7 Analog-Digital-Wandler (ADC)	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{RF,LNA}(t)$: Verstärkte Hochfrequenzsignal (durch LNA)
	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{BB}(t)$: Demoduliertes analoges Basisbandsignal
	<ul style="list-style-type: none"> • $S_{RX}(t)$: Digitalisiertes Basisbandsignal

2.2.1 DAC

Ein Digital-Analog-Wandler (eng. digital-to-analog converter, DAC) wandelt digitale Signale oder einzelne Werte in analoge Signale um. Bei einem digitalen Signal handelt es sich um ein zeitkontinuierliches und wertdiskretes Signal. Durch die Wandlung in ein analoges Signal wird das Signal zeit- und wertkontinuierlich. Dafür werden die Rechtecksignale des digitalen Eingangssignals mit Hilfe einer Fouriertransformation in eine kontinuierlich veränderliche Spannung transformiert. Diese Wandlung ist erforderlich um das Signal über eine Antenne aussenden zu können, da Antennen nur elektromagnetische Wellen abstrahlen können.

$$S_{TX}(t) \rightarrow S_{TX,DAC}(t)$$

2.2.2 LO und Mischer

Der lokale Oszillator (eng. local oscillator, LO) erzeugt eine ungedämpfte hochfrequente Trägerschwingung. Diese Trägerschwingung wird benötigt, um das analoge Signal auf die gewünschte Frequenz zu bringen. Der LO kann in verschiedenen Frequenzen arbeiten, abhängig von der Anwendung und dem gewünschten Frequenzbereich des Signals. In unserer Schaltung ist der LO ein Quarz-Oszillator der bei einer Frequenz $f = 1,25GHz$ schwingt.

Schaut man sich den Schaltplan an, so stellt man fest dass folgendes Bauteil der Mischer und LO ist:

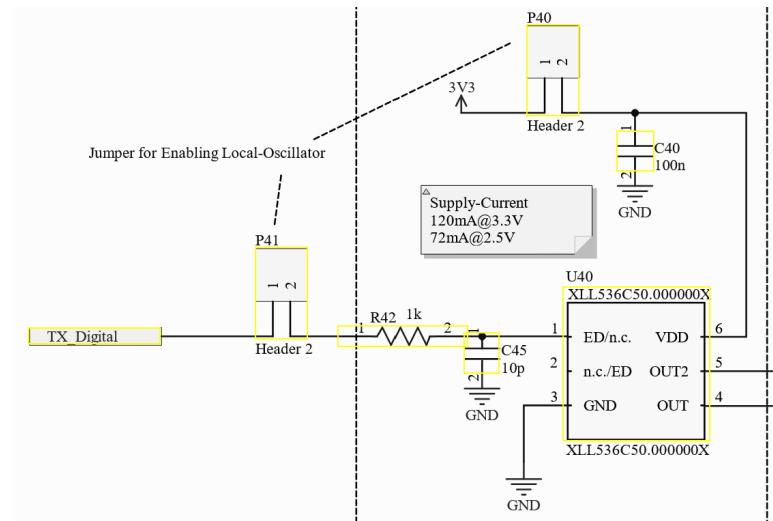


ABBILDUNG 2.4: Mischer und LO

Quelle: [Schaltplan_PCB_V4](#)

Das digitale Datensignal $TX_{Digital}$ (D_{TX}) ist am Oszillatorm am ED-Eingang angeschlossen. Ein Blick ins Datenblatt verrät, dass ED der Enable/Disable-Pin ist. Das bedeutet, der lokale Oszillator wird mithilfe des digitalen Signals an- und ausgeschaltet. Somit haben wir es mit einer **digitalen Amplitudenmodulation** zu tun, genauer gesagt mit dem On-Off-Keying. Das resultierende Signal wird beschrieben durch:

$$S_{TX,DAC}(t) * S_{LO}(t) \rightarrow S_{RF}(t)$$

2.2.3 PA

Der Leistungsverstärker (engl. power amplifier, PA) verstärkt das modulierte Signal auf eine Leistung, die für die Übertragung über eine Antenne geeignet ist. Die hohe Leistung ist notwendig, um über eine größere Distanz senden zu können und um Zuverlässigkeit und Signalqualität zu gewährleisten.

$$S_{RF}(t) \rightarrow S_{RF,PA}(t)$$

2.2.4 Drahtlose Übertragung mit Antennen

Die Sendeantenne strahlt das modulierte HF-Signal S_{Funk} als elektromagnetische Wellen in den Raum ab. Diese abgestrahlte Welle breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und kann von Empfängerantennen empfangen werden. Die Empfängerantenne wandelt die elektromagnetische Welle wieder in eine elektrische Spannung um, die dann weiterverarbeitet werden kann. Diese entspricht jedoch nicht mehr dem ursprünglichen Bandsignal, da es durch Übertragungseinflüsse wie Dämpfung, Rauschen und Interferenzen und viele weitere Einflüsse gedämpft und gestört wurde.

$$S_{RF,PA}(t) \rightarrow S_{Funk}(t) \rightarrow S_{RF,in}(t)$$

2.2.5 LNA

Bei dem LNA (engl. low noise amplifier) handelt es sich um einen rauscharmen HF-Verstärker. Das empfangene Signal $S_{RF,in}$ ist durch die bereits erwähnten Einflüsse sehr schwach und muss zuerst verstärkt werden, um weiterverarbeitet werden zu können. Daraus ist eine Verstärkung des Signals unmittelbar nach den Antennen zwingend notwendig. Der Vorteil des LNA gegenüber anderen Verstärkern ist, dass er kein nennenswertes Rauschen hinzufügt. Dies ist wichtig, da jedes zusätzliche Rauschen die folgende Demodulation erheblich erschweren würde. Ebenfalls ist durch die Position des LNA das empfangene Signal noch nicht durch andere elektrische Komponenten verfälscht worden. Wäre dies nicht der Fall, könnte es durch die spätere Verstärkung zu Rekonstruktionsproblemen des eigentlichen Signals führen.

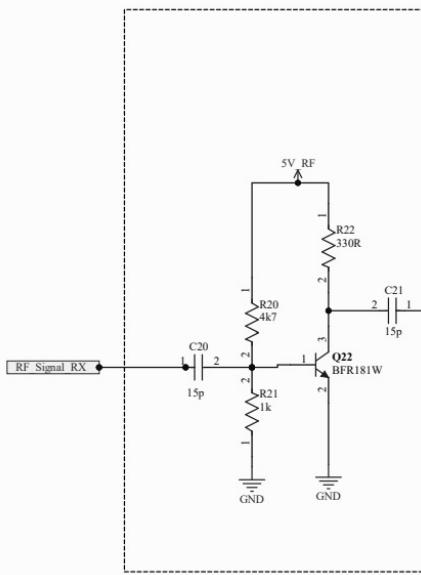


ABBILDUNG 2.5: HF-Vorverstärker

Quelle: [Schaltpunkt_PCB_V4](#)

Beginnen wir nun die Konversion (=Frequenzumsetzung) vom HF-Signal in ein digitales Nutzsignal im Empfänger in unserer Schaltung. In Abbildung 2.5 wird das empfangene Signal $S_{RF,in}(t)$ über den Kondensator C20 eingekoppelt. Q22 ist hierbei ein HF-Transistorverstärker.

$$S_{RF,in}(t) \rightarrow S_{RF,LNA}(t)$$

2.2.6 Demodulation

Die Demodulation ist der Prozess, bei dem das modulierte Signal wieder in das ursprüngliche Datensignal zurückgewandelt wird. Dieser Schritt erfolgt vor dem ADC, weil die Frequenz des Hochfrequenzsignals zu hoch ist, um es direkt mit einem üblichen ADC zu digitalisieren. Die dafür notwendige Abtastrate wäre hierbei extrem hoch. Das Nyquist-Abtasttheorem besagt, dass ein Signal der maximalen Frequenz f_{\max} nur dann verlustfrei rekonstruiert werden kann, wenn die Abtastfrequenz f_s mindestens doppelt so groß ist wie f_{\max} :

$$f_s \geq 2f_{\max} \quad (2.5)$$

Die Trägerfrequenz unseres Modulators beträgt $f = 1,25 \text{ GHz}$. Das würde eine Abtastrate $f_s \geq 2,5 \text{ GS/s}$ ($S = \text{Samples}$) erfordern. ADCs, die in der Lage sind, solch hohe Frequenzen zu verarbeiten, sind kosten-, energie- und datenintensiv.

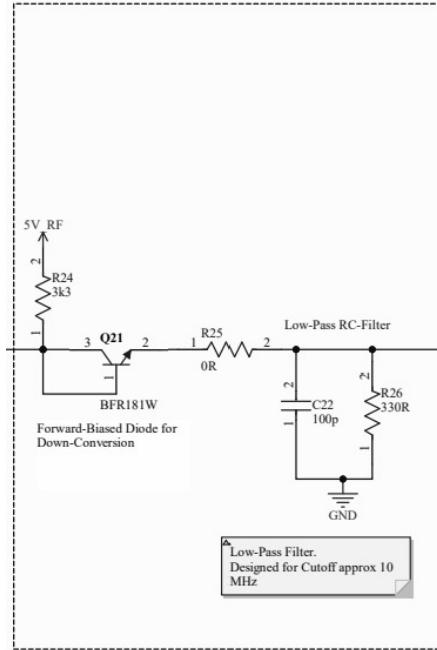


ABBILDUNG 2.6: Demodulator

Quelle: [Schaltplan_PCB_V4](#)

Die Abbildung 2.6 stellt den Demodulator dar. Der Transistor Q21 ist in Diodeschaltung betrieben. Dadurch werden nur positive Halbwellen des Signals durchgelassen (=Gleichrichtung). Danach folgt ein Tiefpassfilter (bestehend aus einer Parallelschaltung aus R26 und C22) mit einer 10-MHz-Grenzfrequenz, der die hochfrequente Trägerwelle unterdrückt und nur das Basisbandsignal $S_{BB}(t)$ (modulierte Hüllkurve) durchlässt.

$$S_{RF,LNA}(t) \rightarrow S_{BB}(t)$$

2.2.7 ADC

Nun muss das demodulierte Signal wieder in ein digitales Signal umgewandelt werden, damit es weiterverarbeitet werden kann. Der Analog-Digital-Wandler (engl. analog-to-digital converter, ADC) besteht in unserer Schaltung aus zwei Komponenten: einem Analogverstärker und einem Komparator.

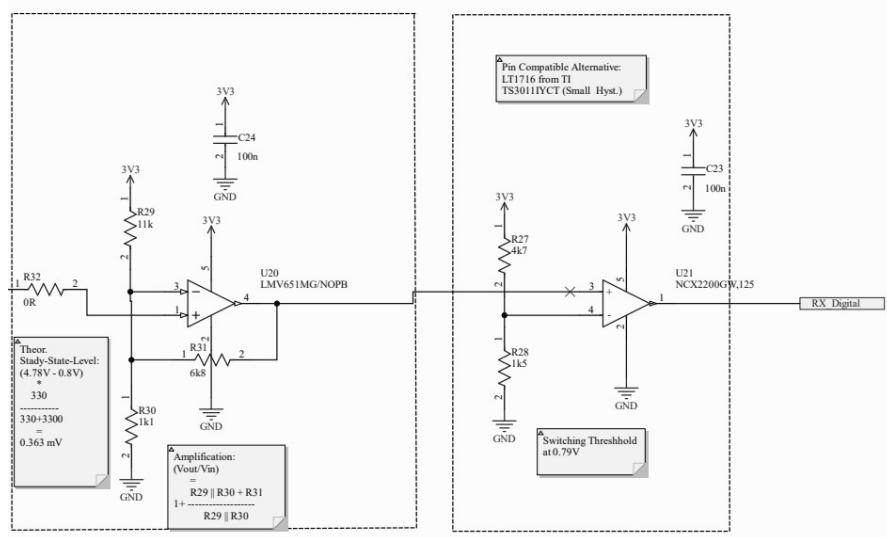


ABBILDUNG 2.7: Analogverstärker und Komparator

Quelle: [Schaltpunkt_PCB_V4](#)

2.2.7.1 Analogverstärker

Der linke Teil der in Abbildung 2.7 dargestellten Schaltung ist der Analogverstärker. Das geschwächte analoge Signal durchläuft den Operationsverstärker U20, um den Pegel oberhalb des festgelegten Schwellwerts für die Komparatorschaltung zu bringen.

2.2.7.2 Komparator

Die rechte Seite der Schaltung bildet der Komparator U21. Dieser vergleicht das demodulierte Signal $S_{BB}(t)$ mit einem festen Schwellwert von 0,79 V. Wird dieser Schwellwert überschritten, gilt:

$$S_{BB}(t) > 0,79 \text{ V} \implies \text{HIGH}$$

$$S_{BB}(t) < 0,79 \text{ V} \implies \text{LOW}$$

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

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

2.3 Mathematische Grundlagen: Fourier-Transformation

Übersichtlichkeitshalber werden in diesem Abschnitt für die Fourier-Transformation die Werte $w_0 = 4\pi$ für Sinusfunktion und $T = 2$ für Rechteckfunktion angenommen. Dies ändert jedoch im Allgemeinen nichts an der Theorie, sondern vereinfacht lediglich die Darstellung der Grafiken.

2.3.1 Betrag und zeitlicher Verlauf von Rechteckfunktion

Der Rechteckimpuls ist eine wichtige Funktion in der Signalverarbeitung. Er wird häufig in der Kommunikationstechnik verwendet, um digitale Signale zu repräsentieren. Der Verlauf der Rechteckfunktion $x(t)$ ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

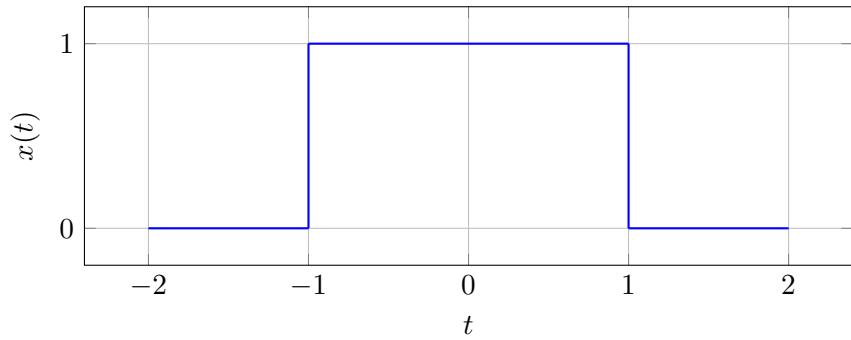


ABBILDUNG 2.8: Verlauf der Rechteckfunktion $x(t)$ mit Amplitude 1 im Intervall $-1 < t < 1$

Die Rechteckfunktion $x(t)$ ist gegeben durch:

$$x(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } -1 < t < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Fourier-Transformierte einer Rechteckfunktion der Breite $2T$ und Höhe 1 ist gegeben durch die normierte sinc-Funktion:

$$\mathcal{F}\{x(t)\} = 2T \cdot \text{sinc}(T\omega) = 2T \cdot \frac{\sin(T\omega)}{T\omega}$$

Der Verlauf der Fourier-Transformierten ist in folgender Abbildung dargestellt:

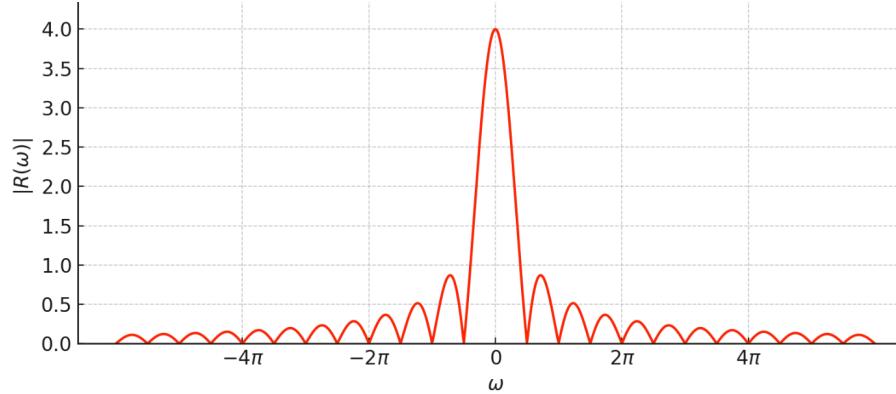


ABBILDUNG 2.9: Betragsspektrum eines Rechteckpulses der Breite $T = 2$

Die Rechteckfunktion ist in der digitalen Signalverarbeitung von Relevanz, da sie eine Basis für die Änderung des Signalpegels darstellt. Durch die Idealisierung lässt sich der High-Pegel (1) und Low-Pegel (0) des Signals gut darstellen. In der Praxis wird die Rechteckfunktion durch eine sinc-Funktion approximiert, um Übertragungsfehler zu minimieren.

2.3.2 Betrag und zeitlicher Verlauf von Sinusfunktion

Der Sinus ist eine wichtige Funktion in der Signalverarbeitung. Er beschreibt eine harmonische Schwingung und ist in der Fourier-Analyse von Bedeutung. Sein Verlauf ist in der Abbildung 2.10 dargestellt. Die Sinusfunktion $x(t) = \sin(t)$ hat eine Periode von 2π und schwingt zwischen -1 und 1. Sie ist punktsymmetrisch um den Koordinatenursprung, was bedeutet, dass $x(-t) = -x(t)$ gilt. Dies ist eine Eigenschaft der ungeraden Funktion.

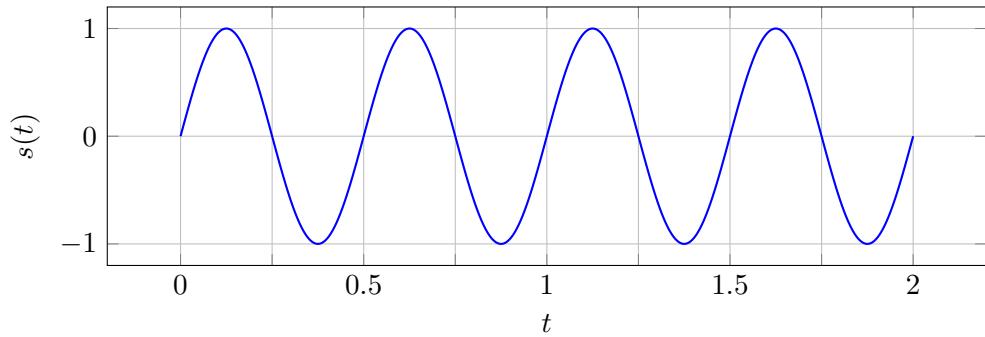


ABBILDUNG 2.10: Zeitverlauf des Sinussignals $s(t) = \sin(\omega_0 t)$ mit $\omega_0 = 4\pi$

Die Fourier-Transformierte der Sinusfunktion $x(t) = \sin(t)$ ist gegeben durch:

$$\mathcal{F}\{\sin(\omega_0 t)\} = \pi j [\delta(\omega + \omega_0) + \delta(\omega - \omega_0)]$$

Der Betrag der Fourier-Transformierten besteht also aus zwei Dirac-Impulsen bei $\omega = \pm\omega_0$.

Die graphische Darstellung der Fourier-Transformierten der Sinusfunktion ist in Abbildung 2.11 zu sehen.

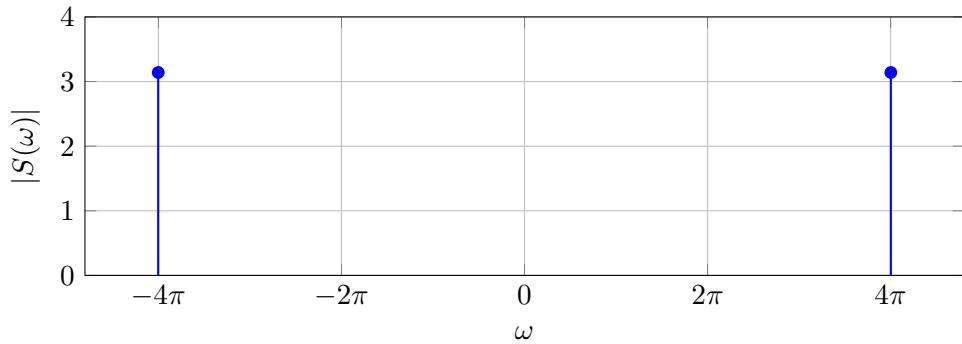


ABBILDUNG 2.11: Betragsspektrum eines Sinussignals $s(t) = \sin(\omega_0 t)$ mit $\omega_0 = 4\pi$

Die Sinusfunktion spielt eine immens wichtige Rolle in der digitalen Signalverarbeitung, da sie der Grundstein der Fourier-Analyse (Fourier-Reihen und Fourier-Transformation) ist. Auch sind diese für lineare zeitinvariante Systeme (LTI) von Bedeutung. Der Sinus ist eine elementare periodische Funktion, seine Periodizität ist das grundlegende Konzept in vielen Signalen. Er lässt auch unter anderem komplex erscheinende Funktionen in Sinuskomponenten zerlegen und somit sie einfacher und kompakter darstellen. Auch in der analogen Signalverarbeitung ist der Sinus von Bedeutung, da er die Basis für die Amplituden-, Frequenz- und Phasenmodulation bildet. Schließlich ist die Idealform der aus der Steckdose kommenden Netzspannung eine Sinuswelle, die in vielen Anwendungen als Referenzsignal dient.

2.3.3 Multiplikation der beiden Funktionen im Zeitbereich

Bei einer Multiplikation der beiden Funktionen im Zeitbereich, also der Rechteckfunktion $x(t)$ und der Sinusfunktion $y(t)$, ergibt sich eine neue Funktion $z(t) = x(t) \cdot y(t)$, die in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Diese Funktion ist das Ergebnis der Punkt-für-Punkt-Multiplikation der beiden Funktionen.

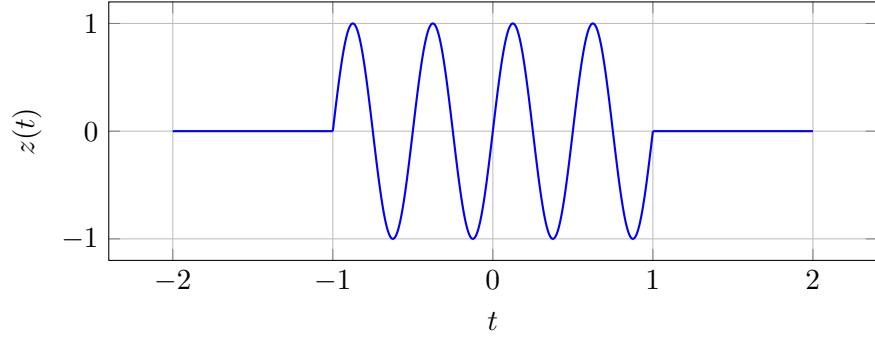


ABBILDUNG 2.12: Multiplikation der Rechteckfunktion $x(t)$ (Breite $T = 2$) mit der Sinusfunktion $y(t) = \sin(4\pi t)$

Die Fourier-Transformierte der Multiplikation zweier Funktionen im Zeitbereich ist gegeben durch die Faltung ihrer Fourier-Transformierten im Frequenzbereich. Das bedeutet, dass die Fourier-Transformierte von $z(t)$, also $\mathcal{F}\{z(t)\}$, das Ergebnis der Faltung der Fourier-Transformierten von $x(t)$ und $y(t)$ ist:

$$\mathcal{F}\{z(t)\} = \mathcal{F}\{x(t)\} * \mathcal{F}\{y(t)\}$$

Die analytische Form der Funktion aus dem Bild lautet:

$$|\mathcal{F}\{z(t)\}| = \left| \frac{T}{2} \left(\text{sinc} \left(\frac{(\omega - \omega_0)T}{2\pi} \right) + \text{sinc} \left(\frac{(\omega + \omega_0)T}{2\pi} \right) \right) \right|$$

Spektrum des Produkts $x(t) = r(t) \cdot \sin(\omega_0 t)$

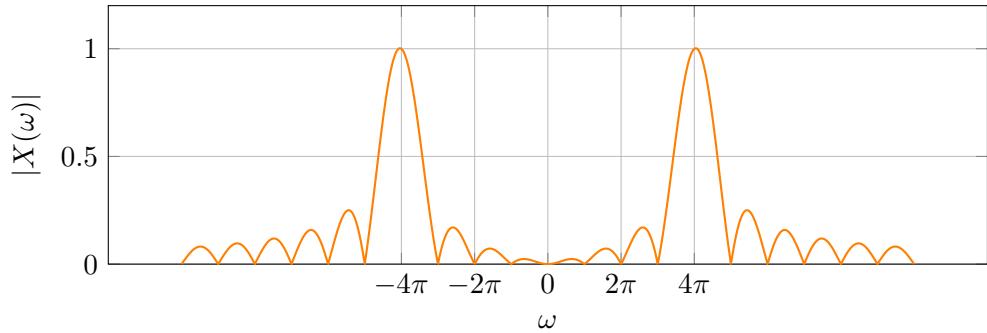


ABBILDUNG 2.13: Allgemeines Betragsspektrum $|X(\omega)|$ des Produkts mit variabler Frequenz ω_0 und Rechteckbreite T

Somit ergibt sich eine Faltung der beiden sinc-Funktionen, die in Abbildung 2.13 dargestellt ist. Diese Faltung führt zu einem Frequenzspektrum, das die Eigenschaften beider Funktionen kombiniert.

Kapitel 3

Versuchsaufbau

3.1 Verwendete Geräte und Materialien

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.
- **Rechner mit der Anwendung "HTerm (HyperTerminal)":** Zur Steuerung der Sendeplatine und ggf. zum Empfang der Daten von der Empfängerplatine.

3.2 Versuchsaufbau

Die Abbildung 3.1 zeigt die Versuchsanordnung und deren Verbindungen. Die Sendeplatine ist mit dem FieldFox Network Analyzer verbunden, um die S-Parameter zu messen.

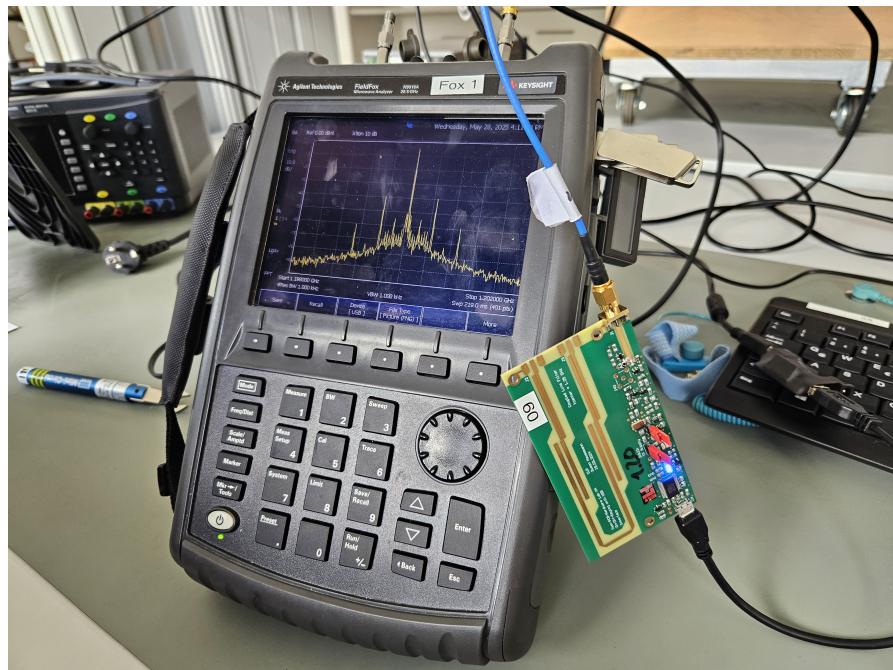


ABBILDUNG 3.1: Versuchsanordnung

Kapitel 4

Durchführung

4.1 Durchführung der Spektrumanalyse

Zunächst wird die Spektrumanalyse mithilfe des FieldFox Spectrum Analyzers durchgeführt. Für eine sinnvolle Analyse wird die ResBW auf 1 kHz eingestellt, um eine ausreichende Auflösung zu gewährleisten. Obwohl die Startfrequenz für die Analyse auf 1,248 GHz und die Stopfrequenz auf 1,252 GHz gesetzt werden sollte, liegt die tatsächliche Trägerfrequenz der Platine selbst bei 1,200 GHz. Deswegen wird die Startfrequenz auf 1,198 GHz und die Stopfrequenz auf 1,202 GHz gesetzt.

4.2 Sender mit und ohne Datenübertragung

Die Messung des Spektrums erfolgt in zwei Szenarien: Zunächst wird der Sender ohne Datenübertragung betrieben, um das Grundrauschen und die Trägerfrequenz zu erfassen. Anschließend wird der Sender mit aktiverter Datenübertragung betrieben, um die Auswirkungen der Modulation auf das Spektrum zu beobachten.

Die Sendeplatine wird zuerst an die Versorgungsspannung angeschlossen, um den Sender zu aktivieren. Es wird eine SMA-Verbindung mit dem FieldFox hergestellt, um das Rauschen zu minimieren.

4.2.1 Messung ohne Datenübertragung

Zuerst soll die Messung ohne Datenübertragung durchgeführt werden. Hierdurch werden die Trägerfrequenz und das Grundrauschen des Senders erfasst. Diese Messung dient als Referenz für die spätere Analyse der Modulationseffekte.

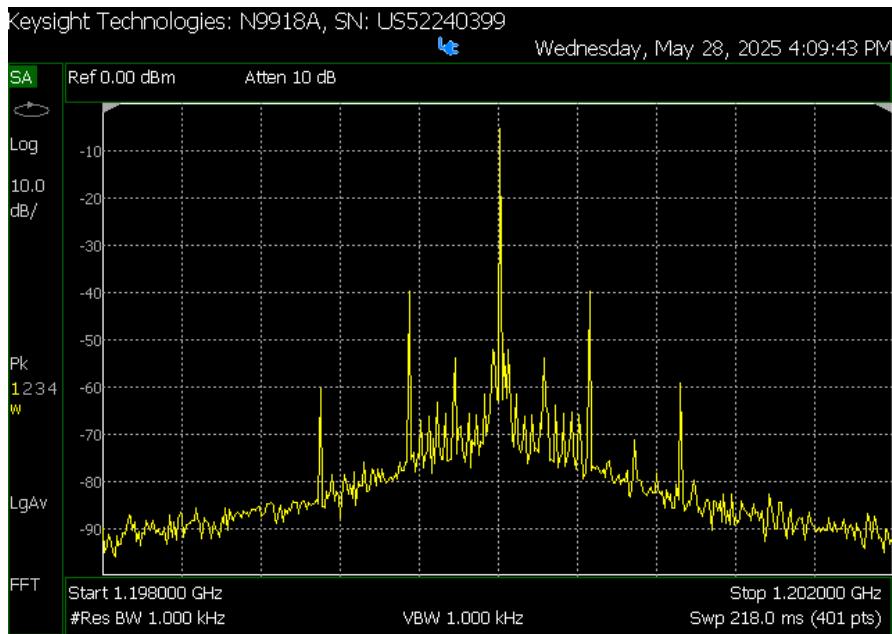
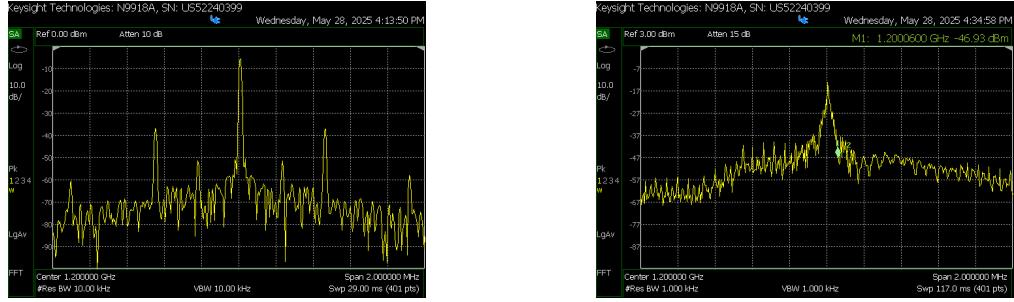


ABBILDUNG 4.1: Frequenzspektrum des Senders ohne Datenübertragung

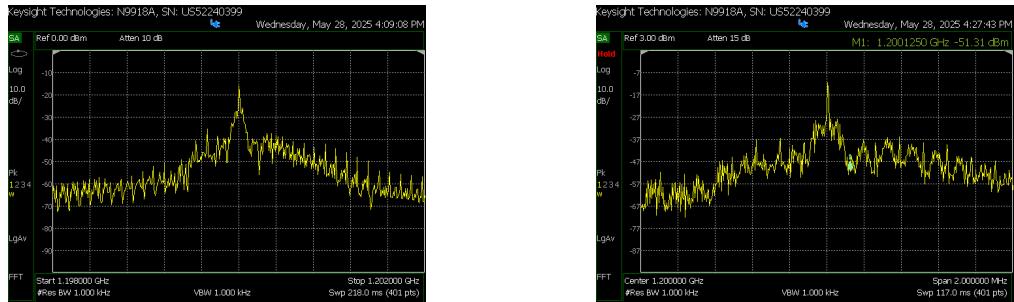
4.2.2 Messung mit Datenübertragung

Anschließend soll die Messung mit Datenübertragung durchgeführt werden. Die Effekte der Modulation auf das Frequenzspektrum werden dadurch sichtbar. Die Modulation verändert die Amplitude und Frequenz des Signals, was zu einer breiteren Verteilung im Frequenzspektrum führt. Die Anwendung HTerm bietet die Möglichkeit, die Daten mit einer variablen Baudrate zu übertragen. In diesem Versuch wurde die Messung bei einigen der zur Auswahl stehenden Baudraten durchgeführt, um die Auswirkungen der Datenrate auf das Frequenzspektrum zu untersuchen. Diese Baudraten sind 1200 Baud, 57600 Baud, 115200 Baud, 128000 Baud und 256000 Baud. Hierbei ist zu beachten, dass die Baudrate von 115200 eine gängige Rate für Mikrocontroller-Kommunikation ist und in vielen Anwendungen verwendet wird.



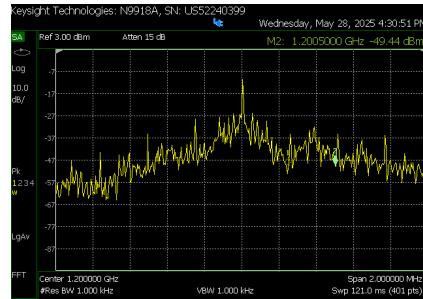
1200 Baud

57600 Baud



115200 Baud

128000 Baud



256000 Baud

ABBILDUNG 4.2: Frequenzspektrum des Senders mit Datenübertragung bei verschiedenen Baudraten.

Anhand der Ergebnisse in Abbildung 4.2 im Vergleich zur Abbildung 4.1 auf, dass es sich bei unserem Versuch um Amplitudenmodulation handelt, da die Amplitude der Trägerfrequenz bei der Datenübertragung nicht konstant bleibt. Diese variiert in Abhängigkeit von der übertragenen Information. Die Frequenz bleibt jedoch konstant, was ein typisches Merkmal der Amplitudenmodulation ist.

Mann kann gut erkennen das die breite der Hauptkeule mit zunehmender Baudrate wächst. Die Baudrate(Datenrate) gibt die Symbolrate an:

$$\text{Baudrate} = \frac{\text{Anzahl der Symbole}}{\text{Zeit in Sekunden}} = \frac{1}{\text{Symbolzeit}} = \frac{1}{T_s} = B \quad (4.1)$$

Nach der Theorie messen wir eine Sinc Funktion.

$$sinc(f) = \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f T_s} \quad (4.2)$$

Die erste Nullstelle der Sinc Funktion entspricht der Baudrate (die Frequenz des Oszilator wird als Koordinatenursprung angenommen) und die anderen Nullstellen sind Vielfache der Baudrate.

$$f_n = n * B \quad (4.3)$$

Betrachtet werden die ersten Nullstellen, sowie die breite der Hauptkeule und der Zusammenhang der Datenrate und der Breite der Hauptkeule.

Baudrate (Baud)	Breite der Hauptkeule (Hz)	$\frac{\text{Breite}}{\text{Baudrate}}$
57600	120000	2.083
128000	250000	1.953
256000	500000	1.953

Empirisch haben wir damit eine Gesetzmäßigkeit gefunden von:

$$Breite = 1.9963 * B \approx 2 * B \quad (4.4)$$

Was auch durchaus zu Theorie passt, denn die Breite der Hauptkeule ist von der f_{-1} bis zur f_{+1} gegeben. Da $f_1 = B$ und $f_{-1} = -B$ ist die Breite der Hauptkeule $2 * B$.

4.3 Vergleich mit den theoretischen Reflexionen

Die Ergebnisse der Spektrumanalyse zeigen, dass die Modulation des Signals bei verschiedenen Baudraten zu unterschiedlichen Frequenzspektren führt. Die Praxis stimmt in Rahmen der Messungenauigkeit mit der Theorie überein. Es wird der Verlauf der Sinc-Funktion sichtbar, natürlich mit Abweichungen, in der Theorie wird z.B. kein Rauschen berücksichtigt.

Kapitel 5

Fazit

5.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Im Rahmen des Versuchs zur digitalen Amplitudenmodulation (On–Off Keying) haben wir uns näher mit dem Thema auseinandergesetzt und wichtige Erkenntnisse gewonnen. Die Trägerfrequenz bleibt bei den zur Verfügung stehenden Platinen konstant bei etwa 1,200 GHz, während ihre Amplitude entsprechend des aktuell vorliegenden Pegels variiert wird. Die Spektren bei verschiedenen Baudaten bestätigten das typische sinc-förmige Hauptkeulenprofil, dessen Breite in guter Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert von $2 \times$ Baudrate liegt. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass mit zunehmender Datenrate die erforderliche Bandbreite linear steigt. Der eingesetzte Demodulator aus einer Gleichrichtung, einem Tiefpassfilter mit einer Eckfrequenz von 10 MHz sowie einer folgenden Verstärkungsstufe und einem Komparator lieferte ein weitestgehend störungsfreies digital Signal; die Wahl einer Komparatorschwelle von 0,79 V ermöglichte dabei eine zuverlässige Unterscheidung zwischen High- und Low-Pegel. Kleinere Abweichungen zwischen den gemessenen und idealisierten Spektren sind durch praktische Versuchsbedingungen wie die begrenzte Auflösung des Spektrum-analysators, Ungenauigkeiten im lokalen Oszillator und Umgebungsrauschen zu erklären.

Literaturverzeichnis

- [1] Hong, J.-S.; Lancaster, M. J.: *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. 2., überarb. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2011. ISBN 978-0-470-40877-3.
- [2] 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 (abgerufen am 19.05.2025).
- [3] Hesselbarth, Jan: Allgemein Wissen. In: Nachrichtentechnik 1. Nachrichtentechnik 1 Skript. Online verfügbar unter: [Nachrichtentechnik1Skript](#), abgerufen am 20.05.2025.
- [4] Elektronik-Kompendium: *Amplitudenmodulation (AM)*. Stand: 12. Dezember 2023. Online verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0211195.htm> (abgerufen am 17.06.2025).
- [5] Roppel, Thomas: *Analoge Modulationsverfahren*. Hochschule Schmalkalden, Fakultät Elektrotechnik. Online verfügbar unter: https://www.hs-schmalkalden.de/fileadmin/portal/Dokumente/Fakult%C3%A4t_ET/Personal/Roppel/Buch/Analoge_Modulationsverfahren.pdf (abgerufen am 17.06.2025).
- [6] 50Ohm.de: *Amplitudenmodulation (AM)*. Ohne Datum. Online verfügbar unter: https://50ohm.de/A_pm.html (abgerufen am 20.06.2025).
- [7] Wikipedia: *Symbolrate*. Letzte Änderung am 6. Juni 2024. Online verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Symbolrate> (abgerufen am 19.06.2025).
- [8] DEWETRON GmbH: *Eine Einführung in Abtastrate, Bandbreite & Co.*, 12. April 2022. Online verfügbar unter: <https://www.dewetron.com/de/news/eine-einfuehrung-in-abtastrate-bandbreite-co/> (abgerufen am 18.06.2025).
- [9] Wikipedia: *Low Noise Amplifier*. Letzte Änderung am 18. Mai 2024. Online verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Low_Noise_Amplifier (abgerufen am 17.06.2025).

- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Krömer, Elisabeth; Schmitz, René: *Fourier-Transformation*. Physikalisch-Chemisches Praktikum, Universität Münster. Online verfügbar unter: https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physikalische_chemie/praktikum/fourier_transformation_kr_mer_elisabeth_schmitz_rene_.pdf (abgerufen am 20.06.2025).
- [13] Elektronik-Kompendium: *Frequenzmodulation*. Stand: 12. Dezember 2023. Online verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0401251.htm> (abgerufen am 16.06.2025).
- [14] Elektronik-Kompendium: *Phasenmodulation*. Stand: 12. Dezember 2023. Online verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0402021.htm> (abgerufen am 17.06.2025).