

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I

## Verbundvorhaben

SiKora

## Sichere Kommunikationsräume

Gefördert durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

Konsortialführung: <b>aeroLiFi GmbH</b>	Förderkennzeichen: <b>01MO23018</b>
Laufzeit des Vorhabens: von: <b>01.01.2023</b> bis: <b>30.11.2024</b>	
Berichtszeitraum: von: <b>01.01.2023</b> bis: <b>30.11.2024</b>	Datum: <b>30.05.2025</b>

### Projektpartner:

1. TU Clausthal

## 1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Ziel des Projekts SiKora war die Entwicklung eines sicheren, optischen Funkkommunikationssystems für Einsatzbereiche mit erhöhten Anforderungen an die Cybersicherheit. Bestehende Technologien wie WLAN oder 5G sind aufgrund ihrer weiten Signalverbreitung durch Wände und offene Räume anfällig für Störungen, Abhören, Spoofing und Jamming. Zur Überwindung dieser Schwachstellen setzte das Projekt auf die Nutzung von Light Fidelity (LiFi), einer Technologie, die Daten über sichtbares oder infrarotes Licht überträgt und so eine räumlich begrenzte, gerichtete Kommunikation ermöglicht.

Ziel war die Entwicklung eines Demonstrators mit modularer Architektur, bestehend aus einer optischen Sende- und Empfangseinheit (Radio Unit, RU) sowie einer signalverarbeitenden Steuereinheit (Distributed Unit, DU) auf Basis von Software Defined Radio (SDR). Unter Berücksichtigung von Open RAN-Prinzipien sollte das System flexibel einsetzbar, zukunftsfähig und kompatibel mit modernen Kommunikationsinfrastrukturen sein.

Das Projekt baute auf dem aktuellen Stand der Forschung im Bereich optische Kommunikation und SDR-Technologie auf und vereinte die industrielle Expertise der aeroLiFi GmbH mit der wissenschaftlichen Kompetenz der TU Clausthal im Bereich Industrial IoT und sicherer, effizienter Datenkommunikation. Dabei verfolgte das Projekt das Ziel, ein praxisnahes System zu realisieren, das als Grundlage für weiterführende Entwicklungen und Anwendungen in sicherheitskritischen Bereichen dienen kann.

## 2. Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war ursprünglich auf 18 Monate ausgelegt, wurde jedoch aufgrund von Verzögerungen bei der Personalgewinnung an der TU Clausthal kostenneutral um fünf Monate verlängert. Trotz dieser Anpassung wurden alle technischen Ziele und Meilensteine erfolgreich innerhalb des erweiterten Zeitrahmens erreicht.

Die Umsetzung erfolgte im Rahmen von vier koordinierten Arbeitspaketen (APs):

- **AP1 (Systemkonzept):** aeroLiFi und die TU Clausthal definierten gemeinsam die Systemarchitektur, inklusive modularer Trennung von RU und DU. Leistungsanforderungen (z. B. 50 Mbit/s Datenrate, 60–70° Abstrahlwinkel, 2 m Reichweite) und Sicherheitsaspekte auf physikalischer Ebene wurden spezifiziert. Das System wurde gezielt so ausgelegt, dass es unempfindlich gegenüber typischen Angriffen auf Funkssysteme (z. B. Jamming, Abhören, Spoofing) ist.
- **AP2 (Frontend Realisierung RU):** Die TU Clausthal entwickelte einen optischen Transceiver mit zweistufigem Verstärker, SPI-/GPIO-gesteuerter Verstärkungs- und Sendeleistungseinstellung und Echtzeit-Rückmeldung zur Signalstärke. Die gemessenen Bandbreiten lagen bei über 180 MHz für Sender und Empfänger und übertrafen die Zielvorgaben. Zudem wurde eine innovative Testlösung zur präzisen optischen Charakterisierung entwickelt, die auch zukünftig in Forschung und Lehre eingesetzt werden kann.
- **AP3 (Software Defined Radio DU):** aeroLiFi realisierte eine softwaredefinierte DU auf Basis von SDR-Plattformen (USRP X300, LimeSDR Mini) unter Verwendung von GNU Radio. Die DU unterstützte BPSK-, QPSK- und OFDM-Modulationen, einen Echtzeit-Steuerkanal, dynamisches Handover sowie adaptive Verstärkungsregelung. Die modulare Softwarearchitektur erlaubte eine flexible Erweiterung zukünftiger Funktionen und bildete damit die Grundlage für eine mögliche spätere Integration in bestehende Kommunikationsinfrastrukturen.
- **AP4 (Systemintegration und Test):** Beide Partner integrierten und testeten das Gesamtsystem gemeinsam. Eine webbasierte Oberfläche auf Basis von Django ermöglichte die Echtzeitüberwachung und manuelle Kontrolle. Der Demonstrator wurde unter verschiedenen Laborbedingungen validiert und zeigte stabile Übertragungen bis 1,3 m, eine robuste Signalqualität, nahtloses Handover sowie hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber gezielten Störungen und Abhörversuchen. Zusätzlich wurden verschiedene Modulationsverfahren, Distanzbereiche und Winkel getestet, um die Grenzen und Potenziale des Systems systematisch zu evaluieren.

### 3. Wesentliche Ergebnisse und technologische Erkenntnisse

Das Projekt SiKora konnte erfolgreich ein modulares, sicheres optisches Kommunikationssystem demonstrieren, das für sicherheitskritische Anwendungen geeignet ist. Der finale Demonstrator zeigte, dass optische Kommunikation unter Einsatz handelsüblicher SDR-Plattformen und spezialisierter optischer Hardware realisierbar und robust ist.

Die zentralen technischen Ergebnisse im Überblick:

- **Optisches Frontend:** Entwicklung eines zweistufigen optischen Empfängers mit SPI-/GPIO-gesteuerter Verstärkungsregelung sowie eines innovativen Empfangsstärke-Indikators zur Erkennung von Interferenzen. Die gemessenen Bandbreiten lagen bei über 180 MHz für Sender und Empfänger. Für die Charakterisierung wurde ein automatisiertes XYZ-Messsystem mit spektraler Analyse eingesetzt.
- **Digitales Backend:** Umsetzung eines softwaredefinierten Senders auf SDR-Plattformen (USRP X300, LimeSDR Mini) mit Unterstützung für BPSK-, QPSK- und OFDM-Modulation. Die SDR-basierte DU umfasste außerdem Paketverarbeitung, Synchronisation, dynamisches Handover und einen Kontrollkanal zur Laufzeitregelung.
- **Stabile Hochgeschwindigkeitsübertragung:** Übertragungsraten von bis zu 60 Mbit/s wurden mit 16PSK-Modulation zuverlässig erzielt.
- **Reichweiten- und Winkelvalidierung:** Die Kommunikation war über Distanzen bis zu 1,3 m stabil möglich. Bei 50 cm wurde ein Abstrahlwinkel von bis zu 40° erreicht.
- **Nahtloses Handover:** Endgeräte können den stärksten Zugangspunkt auswählen und ohne Unterbrechung zwischen mehreren Zugangspunkten wechseln.
- **Jamming-Resilienz:** Zielgerichtete optische Störversuche zeigten hohe Störfestigkeit durch gerichtete Lichtausbreitung.
- **Webbasiertes Monitoring:** Eine Benutzeroberfläche auf Basis von Django erlaubte Live-Visualisierung und Steuerung der Systemparameter.

Die Kombination dieser Beiträge resultierte in einem funktionalen Gesamtsystem mit hoher Flexibilität, das in mehreren Demonstrationen seine Robustheit, Energieeffizienz und Erweiterbarkeit unter Beweis stellte. Die Ergebnisse wurden in mehreren studentischen Arbeiten aufgegriffen und dienen als Grundlage für weiterführende Forschung, Lehre und technologische Weiterentwicklung.

Das Projekt SiKora zeigt deutlich das Potenzial von LiFi für hochsichere und flexible Kommunikationslösungen. Es bietet eine solide technologische Grundlage für industrielle Anwendungen, Normierungsaktivitäten und anwendungsorientierte Forschung in sicherheitsrelevanten Einsatzfeldern.

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II

## Verbundvorhaben

### SiKora

### Sichere Kommunikationsräume

Gefördert durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

Konsortialführung: <b>aeroLiFi GmbH</b>	Förderkennzeichen: <b>01MO23018</b>
Laufzeit des Vorhabens: von: <b>01.01.2023</b> bis: <b>30.11.2024</b>	
Berichtszeitraum: von: <b>01.01.2023</b> bis: <b>30.11.2024</b>	Datum: <b>30.05.2025</b>

#### Projektpartner:

1. TU Clausthal

## 1. Aufgabenstellung

Das Projekt SiKoRa – Sichere Kommunikationsräume hatte zum Ziel, eine innovative Lösung für hochsichere drahtlose Kommunikation in sicherheitssensiblen Innenräumen zu entwickeln. Dabei stand die Nutzung von Licht als Übertragungsmedium im Fokus, um die inhärenten Risiken funkbasierter Protokolle – wie Abhören, Spoofing oder Störung – durch eine physikalisch abgegrenzte und gezielt ausgeleuchtete Kommunikationszone zu minimieren. Der Einsatz optischer Kommunikation bietet insbesondere Vorteile in Bereichen, in denen elektromagnetische Störungen problematisch oder aus Sicherheitsgründen nicht tolerierbar sind.

Ein wesentliches Ziel des Vorhabens war es, die technologische Unabhängigkeit von proprietären Basisbandlösungen zu fördern. Statt auf vorkonfigurierte Chipsätze zurückzugreifen, wurde im Projekt ein vollständig modularer Kommunikationsaufbau auf Basis von Software Defined Radios (SDR) entwickelt. Dieser sollte über offene Schnittstellen flexibel mit einer neu entwickelten optischen Transceivereinheit kommunizieren können. Die zugrunde liegende Architektur orientierte sich an Prinzipien der Open-RAN-Technologie und ermöglichte eine freie Kombination aus Distributed Unit (DU) und optischer Radio Unit (RU), mit klar dokumentierter Schnittstelle zwischen beiden Einheiten.

Das Projekt wurde in vier aufeinander abgestimmte Arbeitspakete gegliedert. In AP1 wurde die Systemarchitektur definiert, die Schnittstellen spezifiziert und die Anforderungen der Zielanwendung formuliert. AP2 beinhaltete die Entwicklung des optischen Frontends (RU) mit Fokus auf Bandbreite, Energieeffizienz und Fernsteuerbarkeit. In AP3 erfolgte die Entwicklung der DU auf Basis von SDR-Hardware und GNU Radio Software, einschließlich aller notwendigen Signalverarbeitungs-, Steuer- und Monitoringfunktionen. Abschließend wurden in AP4 die Systemintegration und die Evaluation der Kommunikationsperformance, Sicherheit und Energieeffizienz durchgeführt.

Im Folgenden werden die Inhalte und Ergebnisse dieser Arbeitspakete detailliert beschrieben.

### AP1: Systemkonzept

Die Arbeiten in AP1 legten die Partner den konzeptionellen und architektonischen Grundstein für das Gesamtsystem. aeroLiFi und die TU Clausthal erstellten die Definition der funktionalen Anforderungen, der angestrebten Leistungswerte, der Architekturentscheidungen und der potenziellen Bedrohungsszenarien bei. Zielanwendungsfall war ein Einsatz in Innenräumen, bei dem sichere, drahtlose optische Kommunikation herkömmliche funkbasierte Systeme ersetzen oder ergänzen konnte, insbesondere in Bereichen mit erhöhten Anforderungen an Cybersicherheit und Störfestigkeit. Das Kommunikationssystem sollte Datenraten von mindestens 50 Mbit/s bei einem räumlich begrenzten Ausleuchtungskegel von 60–70° und einer Reichweite von bis zu 2 Metern erreichen. Darüber hinaus sollte das System widerstandsfähig gegen Stör-, Lausch- und Spoofing-Angriffe sein und die kontrollierte Ausleuchtung von Empfangsbereichen durch LiFi nutzen, um die Sicherheit der physikalischen Schicht zu stärken.

Aus Systemdesign-Sicht wurde eine modulare Architektur basierend auf dem OpenRAN-Paradigma ausgewählt. Das System sollte in eine Distributed Unit (DU), realisiert von aeroLiFi und eine Radio Unit (RU), realisiert von der TU Clausthal, aufgeteilt werden, wobei die DU den Großteil der digitalen Basisbandverarbeitung übernimmt und die RU als optischer Transceiver fungiert. Diese Architekturwahl ermöglichte eine flexible Bereitstellung, die Wiederverwendung von Open-Source-Plattformen und die Möglichkeit, eine vielseitige Steuerungsschnittstelle zwischen DU und RU zu entwickeln. Besonderes Augenmerk wurde auf die funktionale und elektrische Anbindung gelegt, insbesondere durch SPI-Signalsteuerung und Low-Level-GPIO-Steuerungen. Dies legte den

Grundstein für Echtzeit-Anpassbarkeit und hybrides Analog-Digital-Management der optischen Übertragungsparameter.

## AP2: Frontend Realisierung (RU)

Die optische Transceivereinheit (RU) stellt die Schnittstellen zum SDR-basierten Access Point (DU) bereit. Diese Schnittstelle wurde von der TU Clausthal gemeinsam mit dem Partner aerolifi für den Sende- und Empfangspfad spezifiziert (160 MHz Bandbreite, IF-Träger). Um die Energieeffizienz zu adressieren, gibt es im Sendepfad die Möglichkeit, die optische Leistung zu adaptieren. Im Empfangspfad wurden Verstärker mit variablem Gain (VGA) vorgesehen, die neben einer geringeren Leistungsaufnahme bei hoher optischer Eingangsleistung auch einen höheren Dynamikbereich ermöglichen. In beiden Fällen sollten mittels digitaler Schnittstelle diese Funktionen von der DU kontrolliert werden. Abbildung 1 zeigt die geplante Struktur.

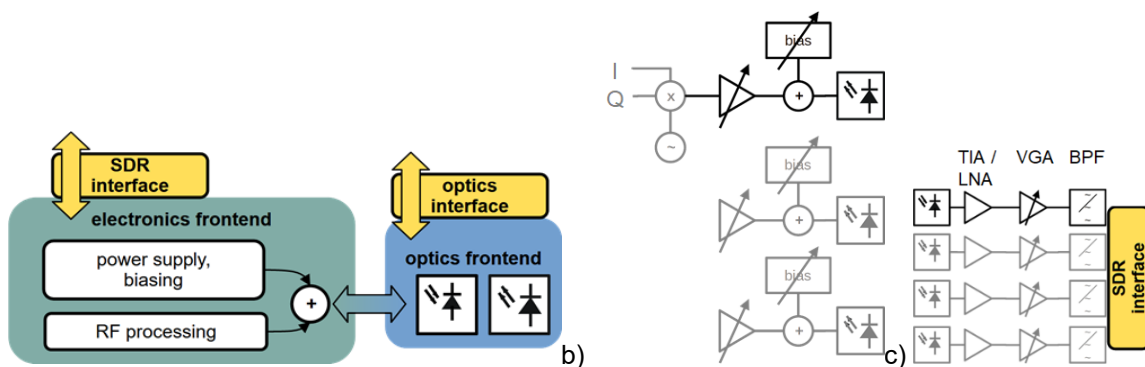


Abbildung 1: a) Struktur der optischen Transceivereinheit, b) Struktur des Senders (mit der Option auf mehrere Kanäle), c) Struktur des Empfängers (mit der Option auf mehrere Kanäle)

Im Schaltungsdesign wurde nach eingehender Untersuchung entschieden, die Bias-Versorgung (d.h. auch Sendeleistungsanpassung) und Nutzsignalmodulation mittels eines breitbandigen Operationsverstärkers zu realisieren. Der Verstärker mit variablen Gain wurde über zwei schaltbare Stufen realisiert, wobei ein Verstärker bei hohen Leistungen komplett abgeschaltet werden kann. Die optische Transceivereinheit beinhaltet damit folgende Hauptkomponenten: Silizium PIN Photodiode - Transimpedanzverstärker - RX HF-Schalter - HF-Verstärker in der Empfangseinheit, Operationsverstärker als LED-Treiber – LED in der Sendeeinheit, ergänzt um Spannungsversorgungs- und Steuerschaltungen. Abbildung 2 zeigt die entworfene Hardware.

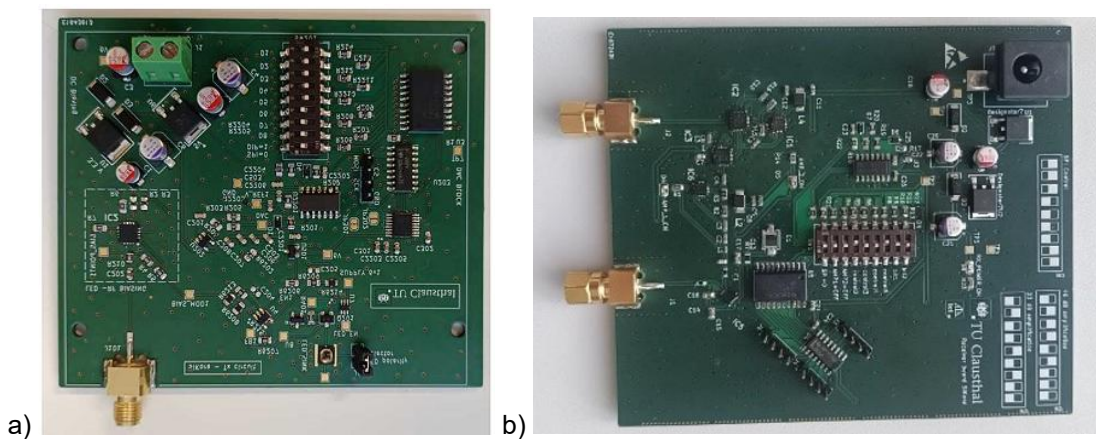


Abbildung 2: entworfene und realisierte Hardware: a) LiFi-Sender, b) LiFi-Empfänger

Im Folgenden sind die wichtigsten Eigenschaften des LiFi-Senders und Empfängers aufgeführt:

#### **LiFi-Sender:**

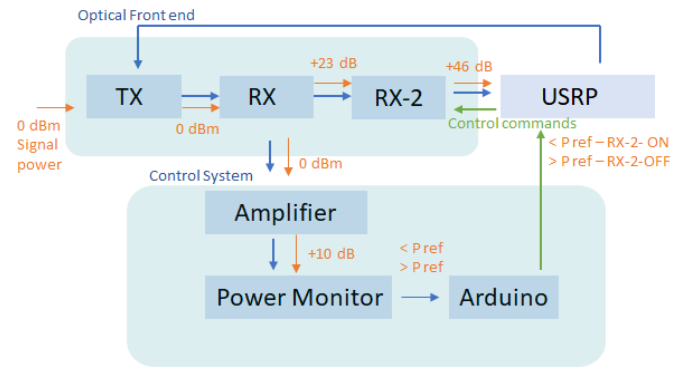
- Konzept:
  - LED-Ausgangsleistung durch Änderung des Treiberstroms vom SDR steuerbar über SPI
  - Datensignal über HF-Interface (SMA) vom SDR bereitgestellt
  - Amplitudenmodulation über Bias-Schaltung
  - Mindestens 160 MHz Bandbreite für Kompatibilität mit u.a. WiFi-Standards
  
- Realisierung in Teilschaltungen
  - Steuerschaltung: Setzt den Treiberstrom entweder per SPI-Interface oder DIP-Schalter.
  - DAC-Schaltung: Steuert den Treiberstrom der LED
  - Bias-Schaltung: Kombiniert das HF-Datensignal und den Treiberstrom der LED
  - Spannungsversorgung

#### **LiFi-Empfänger:**

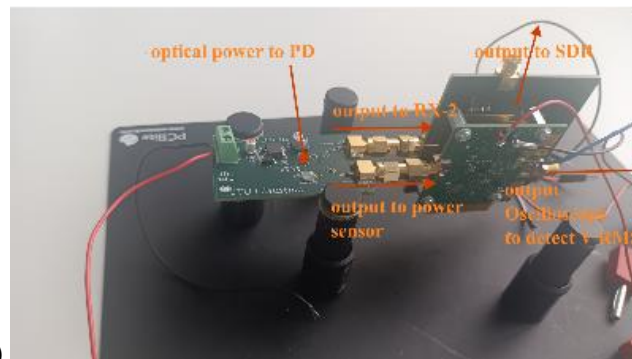
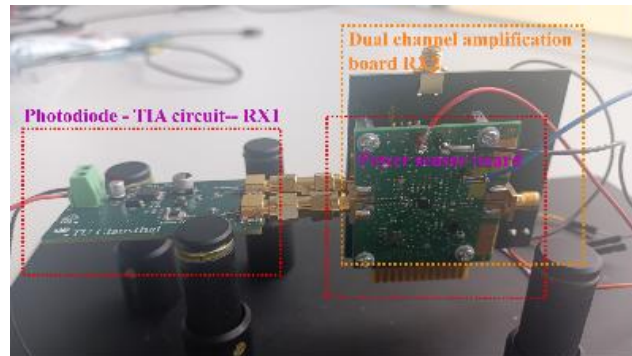
- Konzept:
  - Zwei-stufige Verstärkerschaltung: Bei hohen Eingangsleistungen oder geringen Anforderungen an das SNR kann eine Stufe abgeschaltet werden, um die Leistungsaufnahme zu verringern.
  - Kommunikationsinterface: Die Umschaltung der Verstärkung soll vom SDR schaltbar sein, daher existiert ein SPI-Interface und parallel dazu DIP-Schalter.
  - Empfangsstärke-Indikator: Für die Bewertung der Übertragungskanäle sollen nicht nur die Metriken im SDR zur Anwendung kommen, sondern direkt am Empfänger die Empfangsstärke gemessen werden. Damit kann zum Beispiel Interferenz detektiert werden.
  
- Realisierung in Teilschaltungen:
  - Photodiode und Transimpedanzverstärker: Bereitstellung der Vorspannung der Photodiode und erste Verstärkerstufe mit 50 Ohm Ausgang
  - zwei-stufige Verstärkung: Je nach Eingangsleistung kann eine Stufe abgeschaltet werden.
  - Empfangsstärke-Indikator: Ein Ausgang des Transimpedanzverstärkers kann zur Überwachung der Empfangsstärke genutzt werden.

Der Empfangsstärke-Indikator wurde während der Arbeiten zusätzlich implementiert, er war im Antrag nicht als Modul vorgesehen. Im Rahmen der Systemauslegung stellte sich jedoch heraus, dass dies eine wichtige Funktion ist.

Abbildung 3 zeigt das Blockschaltbild und den Laboraufbau zur Validierung des Empfangsstärke-Indikators. Auch dieser ist digital mit dem SDR verbunden und liefert Informationen zur Empfangssituation.



3a)



3b)

Abbildung 3: Empfangsstärke-Indikator, a) Blockschaltbild, b) Messaufbau

Sowohl die Teilschaltungen als auch die Module wurden charakterisiert. Dabei wurde auch ein automatisierter Aufbau zur räumlichen und spektralen Charakterisierung von LiFi-Quellen realisiert (Abbildung 4).

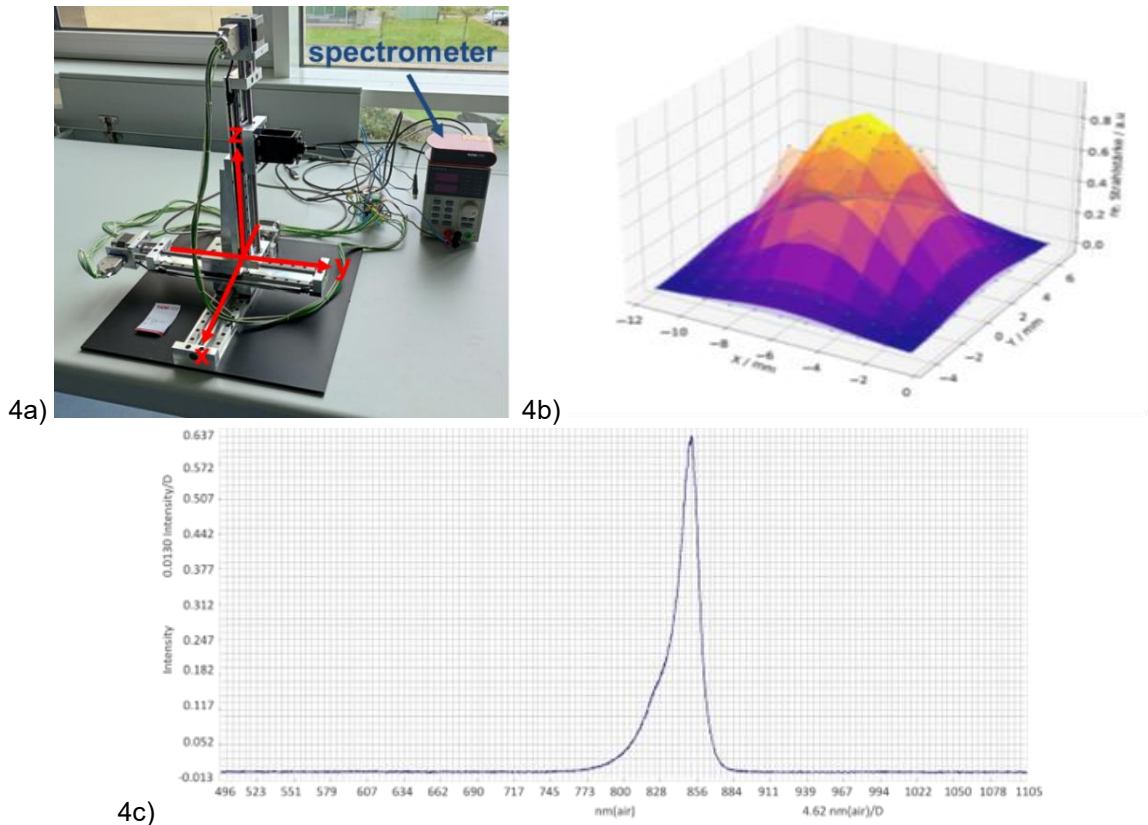


Abbildung 4: Automatisierte Testlösung mit XYZ-Verschiebetisch und Spektrometer, a) Aufbau, b) gemessenes orts aufgelöstes Abstrahlungsverhalten, c) Spektrum an einem Ort

Die Hauptherausforderung bei der Charakterisierung der Sende- und Empfangsmodule war, dass dass z.B. Bandbreitenmessungen im Elektrischen mit einem Vektor-Netzwerk-Analysator (VNA) durchgeführt werden müssen und diese VNAs typischerweise nicht über kalibrierte elektro-optische bzw. opto-elektrische Konverter verfügt. Daher wurde eine – von der 3-Antennen-Methode aus der Hochfrequenzmesstechnik inspirierte – Herangehensweise entwickelt, die eine Bandbreitenbestimmung ohne kalibrierte elektro-optische bzw. opto-elektrische Konverter erlaubt. Hierzu müssen Messungen mit verschiedenen Kombinationen aus elektro-optischen Sendern und elektro-optischen Empfängern durchgeführt werden.

Abbildung 5 zeigt die verwendeten Sender und Empfänger und das entstehende überbestimmte Gleichungssystem (6 Gleichungen für 5 Unbekannte), mit dem die Bandbreiten aller Sender / Empfänger bestimmt werden können. Daraus ist auch eine Publikation entstanden. Da im System nicht genügend Sender / Empfänger existierten, um diese Methode durchzuführen, wurden weitere einfache Test-Einheiten entworfen bzw. genutzt. Es konnte für den entwickelten Transceiver eine Bandbreite von etwa 182 MHz für den LiFi-Sender und 195 MHz für den Empfänger ermittelt werden (Abbildung 6). Damit ist die erforderliche Bandbreite von 160 MHz übertroffen worden.

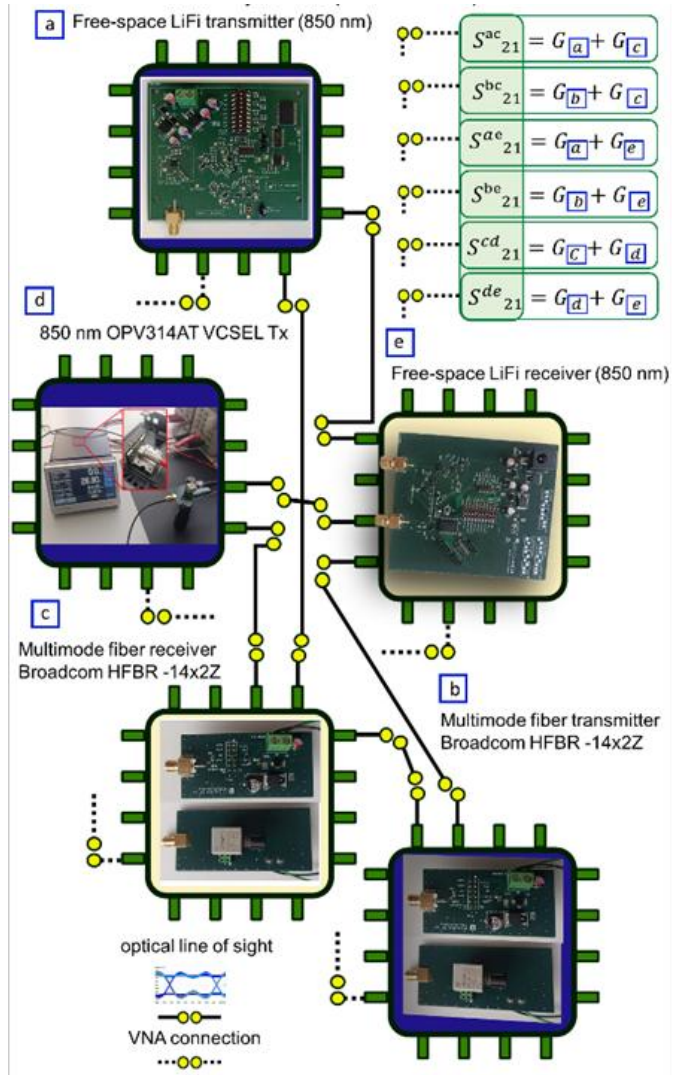


Abbildung 5: Bandbreiten-Charakterisierung mit unkalibrierten Sendern und Empfängern

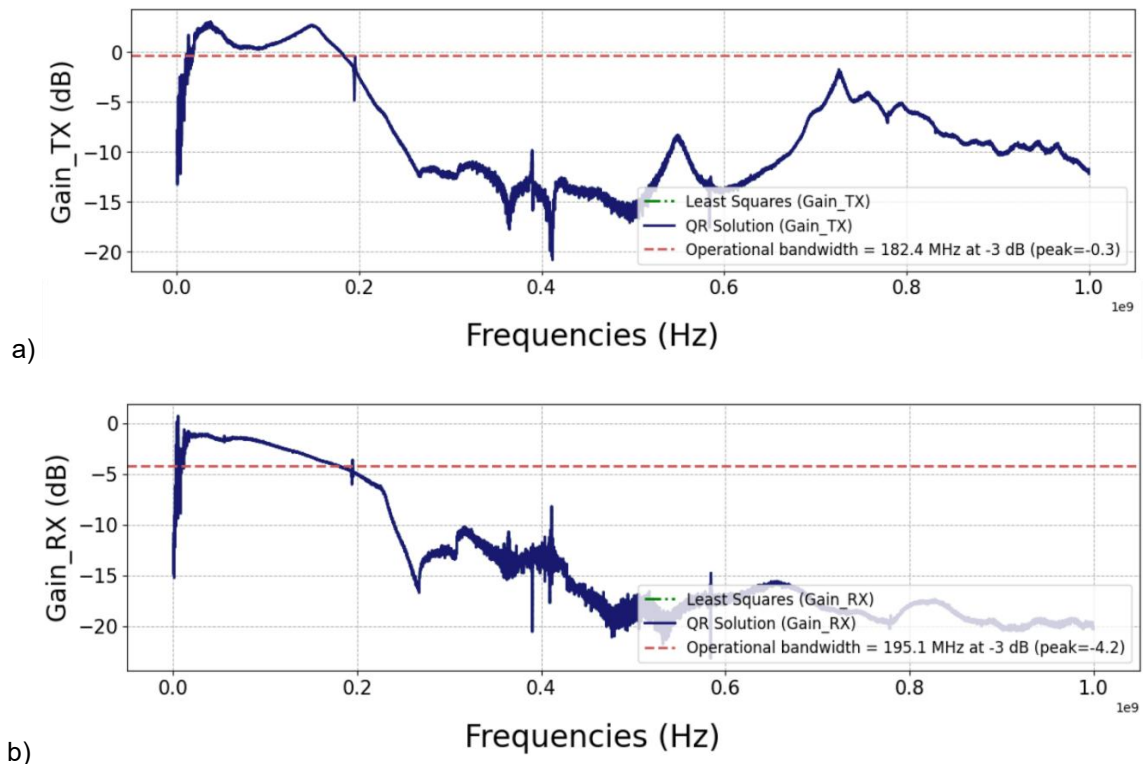


Abbildung 6: Bandbreitenmessung für LiFi-Transceiver, a) LiFi-Sender, b) LiFi-Empfänger

### AP3: Software Defined Radio DU

Die Arbeiten in AP3 stellten den wichtigsten technischen Schwerpunkt von aeroLiFi dar. Im Mittelpunkt dieses Arbeitspakets stand die Entwicklung einer softwaredefinierten Distributed Unit (DU), die die LiFi-Radio Unit (RU) in Echtzeit steuern kann. Die DU wurde nach den Prinzipien der 5G OpenRAN-Architektur entwickelt, bei der Basisbandfunktionen von Funkeinheiten getrennt und auf Standardhardware implementiert werden. Diese Trennung ist besonders im Kontext der optischen drahtlosen Kommunikation von Vorteil, da sie agile, flexible und skalierbare Bereitstellungsmodelle ohne Abhängigkeit von spezialisierten Chipsätzen ermöglicht.

Im SiKora-Projekt demonstrierte aeroLiFi, dass SDR-Plattformen wie USRP X300 und LimeSDR Mini zur Emulation einer DU für optische Frontends verwendet werden können. Dies ist an sich schon eine Innovation, da SDRs typischerweise für HF-Anwendungsfälle optimiert sind. Durch die Anpassung von SDRs zur Modulation und Demodulation optischer Signale ermöglichte aeroLiFi eine schnelle Entwicklung, Prüfung und Neukonfiguration des Kommunikations-Stacks. Durch die Kombination von GNU Radio und benutzerdefinierter Steuerungslogik konnte die DU zudem Signalqualitätsmetriken verwalten und das Übertragungsverhalten in Echtzeit anpassen.

Die DU war für die Generierung der digitalen Wellenform, die Verwaltung der Paketstrukturen sowie die Implementierung der Kanalkodierung und -dekodierung verantwortlich. Im Rahmen der OpenRAN-Philosophie wurden diese Prozesse in Softwareblöcke abstrahiert, die in GNU Radio implementiert und visualisiert wurden. Diese softwarebasierte Architektur stellte sicher, dass zukünftige Erweiterungen wie Verschlüsselung oder Protokollanpassung problemlos integriert werden konnten.

### 3.1 SDR-Auswahl

In AP 3.1 war aeroLiFi für die Auswahl geeigneter Software Defined Radio (SDR)-Plattformen als Basis für die Distributed Unit (DU) verantwortlich. Nach detailliertem Benchmarking wurden zwei Schlüsselplattformen ausgewählt: der USRP X300 und der LimeSDR Mini.

Der USRP X300 wurde aufgrund seiner hohen Leistung, seiner dualen 10-Gigabit-Ethernet-Schnittstellen und seiner FPGA-Unterstützung für schnelle Echtzeitverarbeitung ausgewählt. Er bot eine Bandbreite von bis zu 120 MHz und verfügte über eine modulare Architektur, die Tochterplatinen unterstützte und so Flexibilität über verschiedene Frequenzbänder hinweg ermöglichte.

Der LimeSDR Mini wurde als ergänzende, kompakte und kostengünstige Plattform ausgewählt. Er arbeitet im Frequenzbereich von 10 MHz bis 3,5 GHz und eignete sich besonders für Prototyping in der Frühphase. Sein USB-betriebener Formfaktor und sein Open-Source-Ökosystem machten ihn ideal für schnelle Experimente und Demonstrationsszenarien.

Diese Plattformen bildeten das Rückgrat der DU-Entwicklung und boten eine Kombination aus Echtzeitverarbeitung, Bandbreitenanpassung und einfachen Experimentiermöglichkeiten, die für eine agile Hardware-Software-Integration unerlässlich sind.

### 3.2 Auswahl der Software-Suite

Im Rahmen der DU-Entwicklung wurden verschiedene Softwareumgebungen evaluiert, darunter GNU Radio, Matlab/Simulink, LabVIEW, Pothos und proprietäre SDR-SDKs. Jede Option wurde auf Flexibilität, Community-Unterstützung, einfache Integration mit ausgewählter SDR-Hardware und Eignung für die Hochgeschwindigkeitssignalverarbeitung analysiert.

GNU Radio wurde letztendlich aufgrund seines Open-Source-Charakters, seiner umfangreichen Blockbibliothek, seiner Kompatibilität mit USRP- und LimeSDR-Plattformen und seiner starken Entwickler-Community ausgewählt. Im Gegensatz zu Matlab oder LabVIEW, die teure Lizenzen erfordern und weniger einsatzfähig sind, ermöglichte GNU Radio dem Team die Prototypisierung und Implementierung aller notwendigen Basisbandverarbeitungsschritte mit voller Transparenz und Kontrolle. Der grafische Flussdiagramm-Editor vereinfachte das Debuggen und die Design-Iteration, und die Integration mit Python ermöglichte benutzerdefinierte Erweiterungen.

### 3.3 Systemarchitektur

Die finalisierte Systemarchitektur spiegelt das zentrale Designprinzip einer modularen und disaggregierten Netzwerkinfrastruktur wider, inspiriert von 5G OpenRAN. In diesem Modell ist die Basisbandverarbeitung in eine zentrale Einheit (CU), eine DU und RUs aufgeteilt. Die DU, implementiert auf SDR-Plattformen, war die zentrale Komponente der aeroLiFi-Entwicklung und fungierte als Brücke zwischen der RU und der breiteren Netzwerkstruktur.

Die Architektur, wie in Abbildung 7 dargestellt, beginnt mit dem Kernnetz, das mit einer CU verbunden ist, die nicht in Echtzeit ablaufende und zentralisierte Verarbeitungsaufgaben übernimmt. Die CU kommuniziert mit der DU über eine externe standardisierte Schnittstelle (im Diagramm durch blau gestrichelte Pfeile dargestellt), die nicht Teil des SiKora-Projektumfangs war. aeroLiFi konzentrierte sich auf die Implementierung der internen Schnittstellen, die durch durchgezogene schwarze Pfeile zwischen der DU und mehreren RUs dargestellt sind.

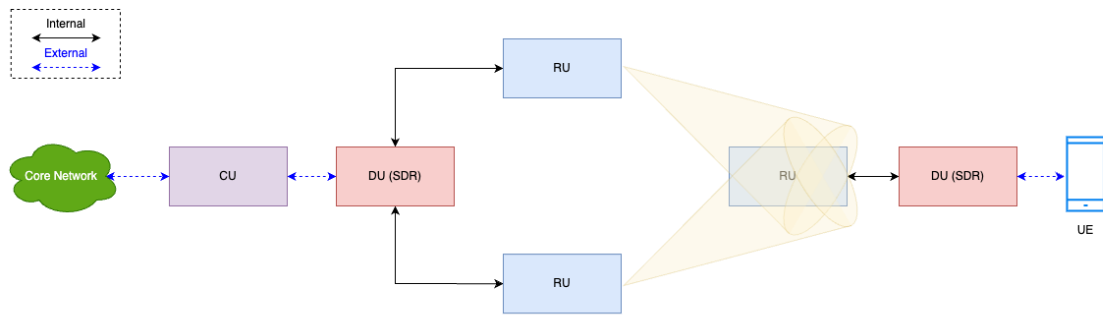


Abbildung 7: Systemarchitektur

Jede DU, basierend auf USRP oder LimeSDR, verarbeitet Basisbandsignale und überträgt Daten über SMA-Schnittstellen an die RUs. Zusätzlich werden Steuerkanalsignale über GPIO-Pins übertragen und beinhalten Echtzeit-Verstärkungsregelung und Sendeleistungsbefehle. Die RUs steuern die analogen optischen Frontends, senden modulierte Daten über LEDs und empfangen sie über Fotodioden.

Der modulare Aufbau des Systems ermöglicht es einer einzelnen DU, mehrere RUs gleichzeitig zu steuern und so Handover und räumliche Abdeckungssteuerung zu ermöglichen. Dies wird durch die Aufteilung des Signalpfads von der DU zu den RUs angezeigt. Auf der Empfangsseite kann eine weitere DU das Signal vom Benutzergerät (UE) demodulieren und dekodieren.

Diese Architektur unterstützt skalierbare Implementierungen durch die Entkopplung der Steuerlogik und der physischen Übertragungskomponenten. Die Trennung ermöglicht zudem Energieoptimierung und Rekonfiguration während der Laufzeit und unterstützt mehrere RUs pro DU mit gerichteten Übertragungskegeln für zonenbasierte sichere Kommunikation.

Die internen Schnittstellen (durchgezogene Pfeile) wurden während des SiKora-Projekts vollständig implementiert und getestet, während die externen Schnittstellen (gestrichelte Pfeile) als außerhalb des Projektumfangs liegend betrachtet wurden.

### 3.4 Kommunikationssoftware

Die Implementierung der Signalverarbeitung konzentrierte sich zunächst auf die Etablierung einer stabilen Übertragung mittels Quadratur-Phasenumtastung (QPSK). Dieser erste Schritt bot eine vereinfachte und kontrollierte Umgebung zur Überprüfung der grundlegenden Integrität der Send- und Empfangskette, wie in Abbildung 8 dargestellt.

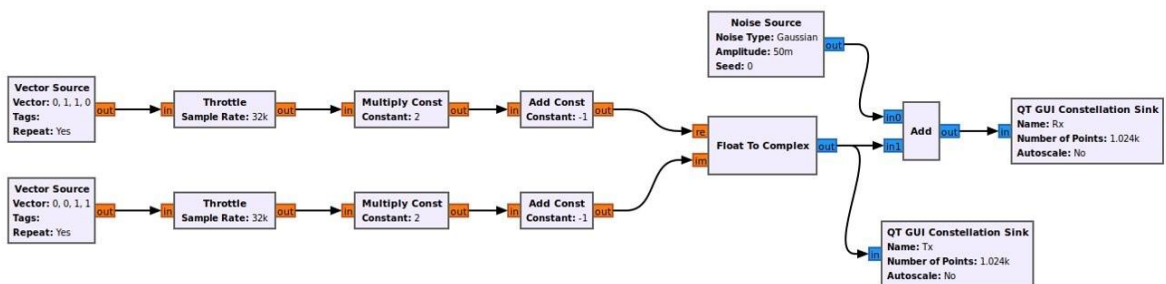


Abbildung 8a: QPSK-Flussdiagramm

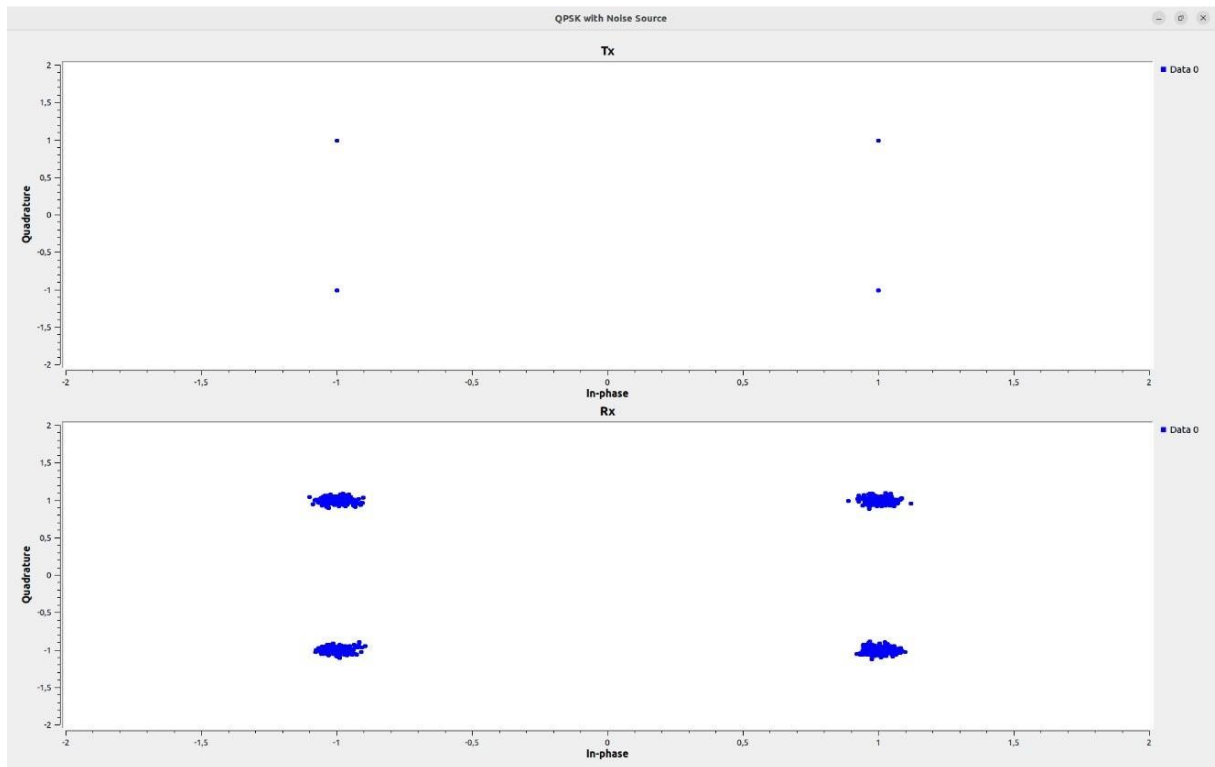


Abbildung 8b: Gesendete und empfangene QPSK-Signale

Nachdem die funktionale Stabilität erreicht war, befasste sich das Projekt mit drei zentralen Herausforderungen der drahtlosen Kommunikation: Mehrwegeausbreitung, Zeitsynchronisation und Frequenz-/Phasenversatz.

1. Mehrwegeausbreitung: In optischen Systemen in reflektierenden Innenräumen kann Mehrwegeausbreitung zu Intersymbolinterferenzen (ISI) führen. Dabei erreichen Signalreflexionen den Empfänger mit leichter Verzögerung und beeinträchtigen das gewünschte Signal. Um dies zu verhindern, wurden Pulsformungsfilter eingesetzt, um die Bandbreite zu steuern und spektrale Leckagen zu begrenzen. Eine angepasste Filterung am Empfänger gewährleistete die Signalintegrität durch Maximierung des Signal-Rausch-Verhältnisses zum Zeitpunkt der Abtastung.

2. Timing-Synchronisierung: Da Sende- und Empfangs-SDRs mit unabhängigen Takten arbeiten, ist präzises Symbol-Timing entscheidend. Das Team implementierte eine mehrphasige Taktsynchronisation, um den Abtastpunkt des Empfängers dynamisch auf den Mittelpunkt des übertragenen Symbols auszurichten. Dies minimierte Timing-Jitter und Abtastdrift.

3. Frequenz- und Phasenoffset: SDR-Hardware führt zu kleinen Unterschieden in Oszillatorfrequenzen und -phasen. Um dies zu beheben, wurde eine Costas-Schleife integriert, um den Träger wiederherzustellen und die Phasenkohärenz aufrechtzuerhalten. Diese Schleife verfolgte und korrigierte Frequenz- und Phasenfehler in Echtzeit.

4. Entzerrung: Um unterschiedliche Kanalverstärkungen und Verzögerungen durch das analoge Frontend und den optischen Pfad zu kompensieren, wurde ein linearer Equalizer eingesetzt. Dieser passte die Filterkoeffizienten dynamisch an, um die Gesamtkanalantwort zu glätten und so die Demodulationsgenauigkeit zu verbessern.

Nach der individuellen Validierung der einzelnen Techniken wurden diese in eine zusammenhängende Signalverarbeitungskette innerhalb von GNU Radio integriert. Dieses finale Flussdiagramm kombinierte paketbasierte Übertragung mit diesen Techniken, wie in Abbildung 9 dargestellt. Die GNU Radio-Umgebung ermöglichte die Paketierung durch Stream-zu-Tag-Stream-Konvertierung,

Zugriffscodekorrelation zur Nutzdatenextraktion und Neupaketierung zur Bitstromwiederherstellung. Dieser Aufbau ermöglichte eine Echtzeit-Datenübertragung mit hoher Integrität über die optische Verbindung unter Verwendung von Standardmodulationsformaten.

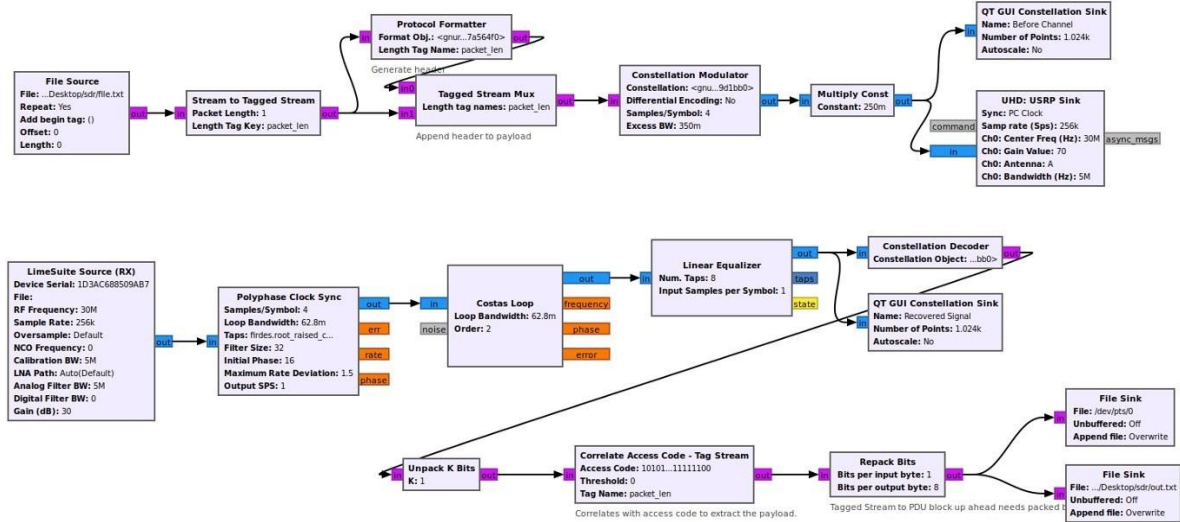


Abbildung 9: Flussdiagramm mit Paketierung und Blöcken zur Bewältigung der Herausforderungen der drahtlosen Kommunikation

### 3.5 Spezielle Softwarefunktionen: OFDM, Handover und Steuerkanal

Über die grundlegende Übertragung hinaus enthielt der DU-Software-Stack erweiterte Funktionen zur Unterstützung des praktischen Einsatzes. Ein OFDM-Modulationsverfahren wurde entwickelt, um mehrere RU-Verbindungen durch spektrale Teilung zu ermöglichen, wie in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

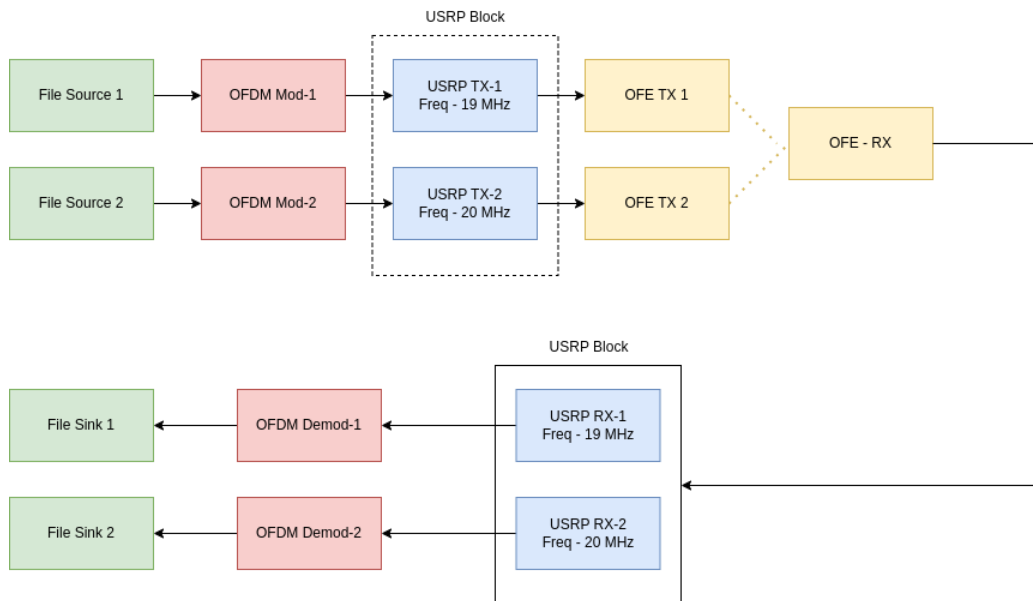


Abbildung 10: OFDM-Blockdiagramm

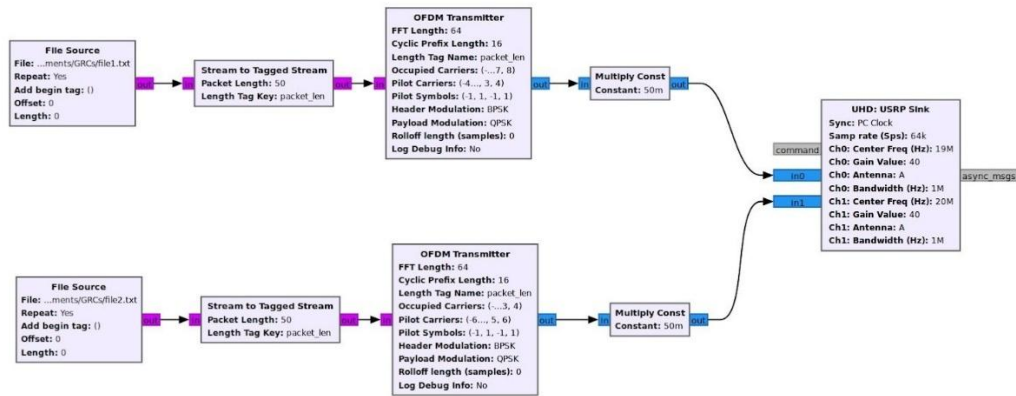


Abbildung 11a: OFDM-TX-Flussdiagramm

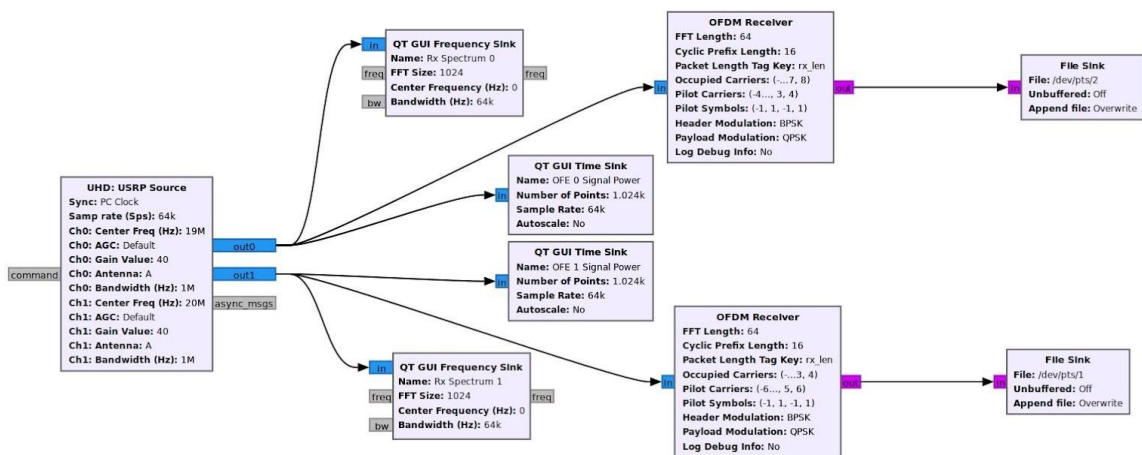


Abbildung 11b: OFDM-RX-Flussdiagramm

Dies war entscheidend für die Unterstützung des Handovers: Die DU konnte gleichzeitig Beacons von mehreren RUs senden, sodass ein Empfänger das stärkste Signal auswählen und einen Übergang einleiten konnte. Die Übergabe wurde als dynamischer Entscheidungsprozess in der DU implementiert, wobei der Client basierend auf den empfangenen Leistungsschwellenwerten nahtlos zwischen den RUs wechseln konnte. Diese Funktionalität war entscheidend für die Mobilität und gewährleistete eine robuste Konnektivität in komplexen Umgebungen.

Eine weitere bemerkenswerte Innovation war die Entwicklung eines parallel zum Datenstrom implementierten Steuerkanals. Dieser Steuerkanal ermöglichte der DU die kontinuierliche Überwachung der empfangenen Signalstärke und die Anpassung der Verstärkungspegel des Empfängers. Ein Mikrocontroller in der RU dekodierte die SPI-Befehle der DU und wählte die entsprechende Verstärkungskonfiguration. Dies optimierte nicht nur die Signalqualität, sondern unterstützte auch einen energieeffizienten Betrieb durch Reduzierung unnötiger Verstärkung bei günstigen Signalbedingungen.

### 3.6 Kombinierte Software-Suite

Das finale System demonstrierte eine umfassende Kombination aller implementierten Funktionen. BPSK/QPSK- und OFDM-Modulation unterstützten flexible Durchsatzmodi. Der integrierte Übergabealgorithmus ermöglichte einen nahtlosen Wechsel zwischen den RUs in Live-Szenarien. Der Steuerkanal bot Closed-Loop-Feedback und adaptive Verstärkungsregelung.

Der komplette Software-Stack, wie im GNU Radio-Flussdiagramm dargestellt, fungierte als modulares Testfeld, in dem jeder Block einzeln angepasst oder ersetzt werden konnte. Diese Demonstrationen bestätigten die Stabilität und Interoperabilität der softwaredefinierten DU und ihre Eignung für den Einsatz in Industrie und Forschung.

Spezielle Softwarefunktionen: OFDM, Handover und Steuerkanal Der Software-Stack verfügt über erweiterte Funktionen. OFDM ermöglichte die spektrale Aufteilung auf mehrere RUs. Handover ermöglichte die dynamische Auswahl der RU basierend auf der empfangenen Leistung. Ein paralleler Steuerkanal ermöglichte es der DU, die Signalstärke zu überwachen und die RU dynamisch über SPI zur Anpassung der Verstärkung zu steuern, was energieeffiziente Anwendungen unterstützte.

#### AP4: Systemintegration und Test

Die Arbeiten in AP4 konzentrierten sich auf die vollständige Systemintegration der DU mit der RU sowie die Validierung von Leistungs-, Sicherheits- und Energieeffizienzaspekten in einer kontrollierten Laborumgebung. Wie in Abbildung 12 dargestellt, basierte der Prüfstand auf einem USRP X300 SDR, der mit einem GNU Radio PC verbunden war, der als DU fungierte. Zwei optische Sender (TX Board 1 und TX Board 2, die als Access Points AP1 und AP2 fungierten) erzeugten LiFi-Kanäle, die auf einen gemeinsamen Empfänger gerichtet waren. Das Empfangsende war mit einem photodiodenbasierten RX Board und einem sekundären RX2 Board ausgestattet, das mit einem Arduino zur Verstärkungsregelung und Statusrückmeldung verbunden war. Der Steuerpfad nutzte GPIO-Signale zwischen SDR und Arduino, um die Verstärkungspegel dynamisch basierend auf der Signalstärke zu steuern. Abbildung 13 zeigt ein Foto des Testfelds im Labor.

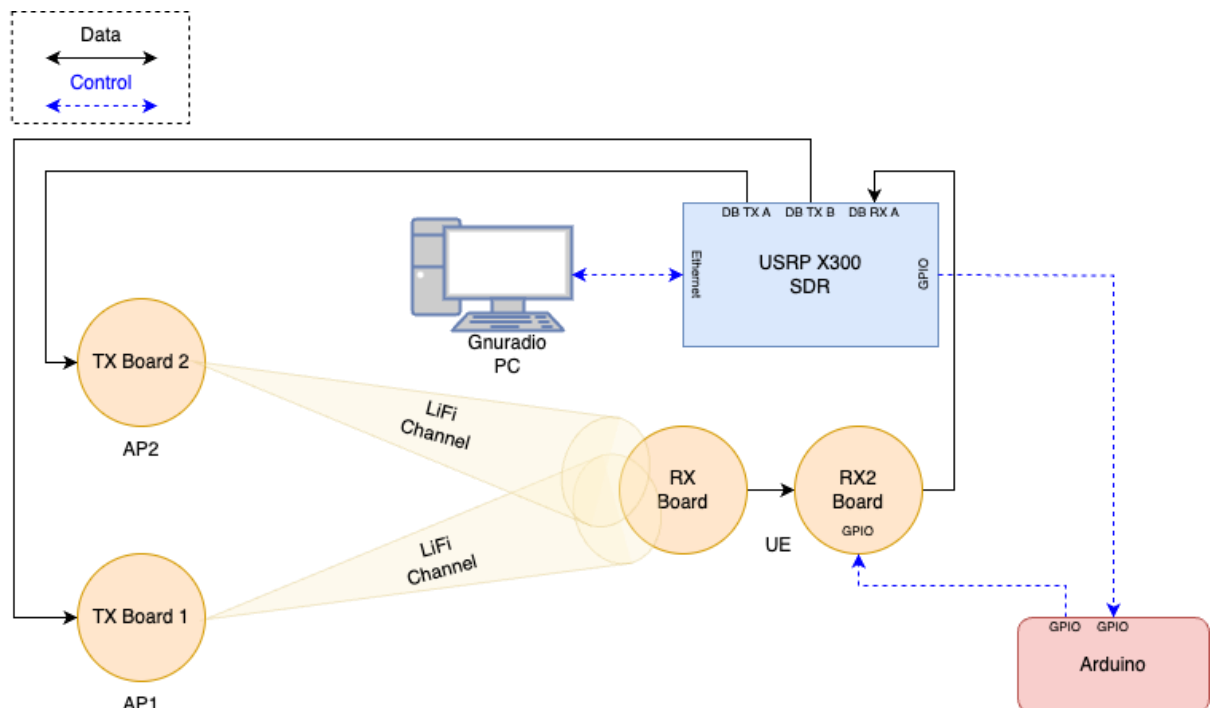


Abbildung 12: Testfeldarchitektur

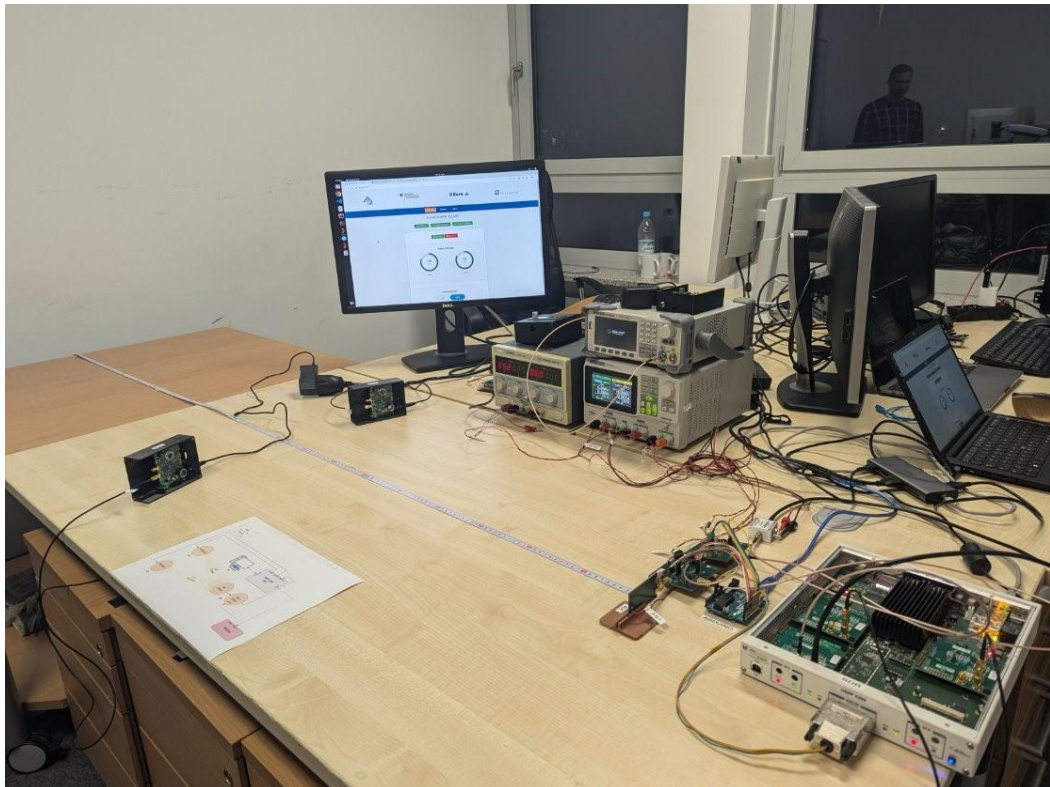


Abbildung 13: Testfeldfoto

Ein wichtiger Meilenstein in AP4 war die Entwicklung eines intuitiven, webbasierten Dashboards auf Basis des Django-Frameworks, das die Live-Überwachung und Steuerung von Systemparametern ermöglichte. Das in Abbildung 14 dargestellte Dashboard visualisierte die Signalstärke in Echtzeit, zeigte Datenraten an und ermöglichte manuelle Eingriffe zum Testen verschiedener Steuerungsstrategien. Diese Schnittstelle verbesserte die Transparenz und Zugänglichkeit des Testfelds sowohl für internes Debugging als auch für öffentliche Demonstrationszwecke erheblich.

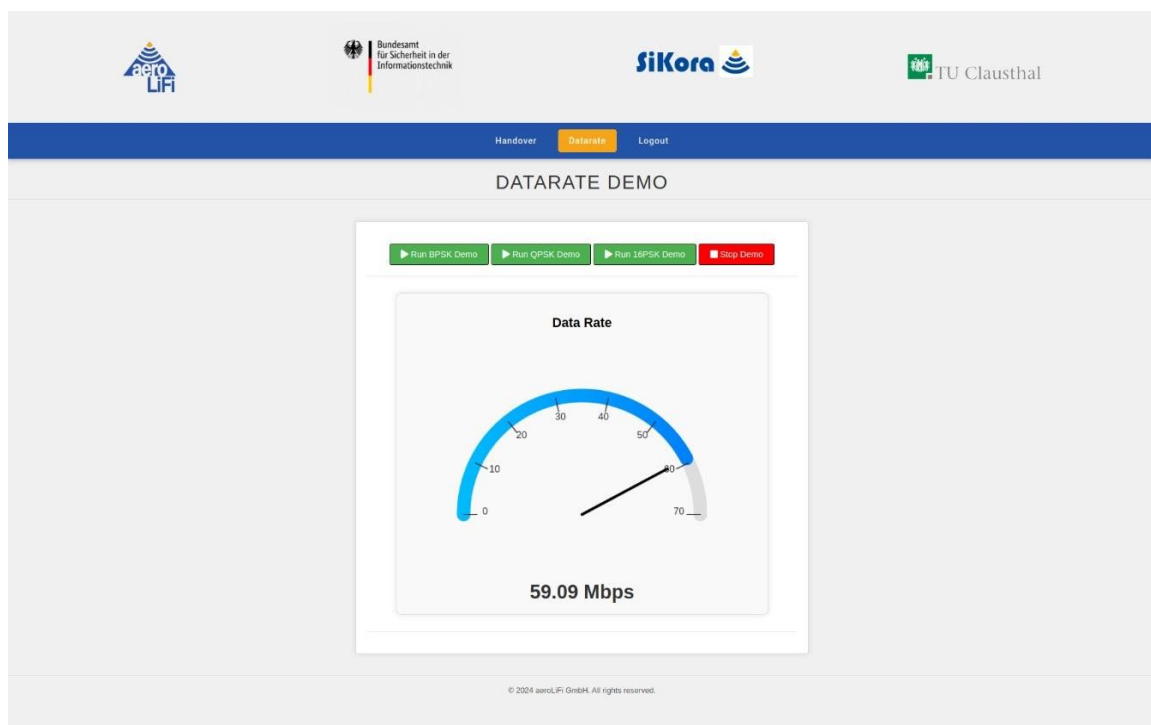


Abbildung 14: Demo-Dashboard

Aus Leistungssicht wurde das System unter verschiedenen Entfernungen, Winkeln und Umgebungslichtbedingungen getestet. Die Datenübertragung erfolgte mit BPSK-, QPSK- und OFDM-Modulationen des SDR, um die entfernungsabhängige Dekodierleistung zu bewerten.

In Demo 1 wurde die Entfernung zwischen Sender (TX) und Empfänger (RX) schrittweise erhöht, um die effektive Dekodiergrenze für jedes Modulationsverfahren unter verschiedenen RU-Konfigurationen zu messen.

Die folgenden Ergebnisse wurden beobachtet:

RU-Konfiguration	BPSK-Dekodierbarkeit	QPSK-Dekodierbarkeit
Verstärkung der ersten Stufe	< 30 cm	< 30 cm
Verstärkung beider Stufen	< 130 cm	< 130 cm

Diese Messungen bestätigten eine stabile Kommunikation bei bis zu 130 cm mit zweistufiger Verstärkung und validierten die Anpassungsfähigkeit der Verbindung an verschiedene Modulationsformate und Verstärkungskonfigurationen. Abdeckungstests zeigten Winkelbereiche von bis zu 40° bei 50 cm und 20° bei 100 cm.

Demo 2 demonstrierte die dynamische Übergabe zwischen den beiden Sendern (TX-Board 1 und TX-Board 2) basierend auf der empfangenen Signalstärke am Empfänger. Der in die DU integrierte Übergabealgorithmus erkannte schwächer werdende Signalpegel von einem AP und leitete die Kommunikation nahtlos und ohne Benutzerunterbrechung zur stärkeren Signalquelle um, wie in Abbildung 15 dargestellt.

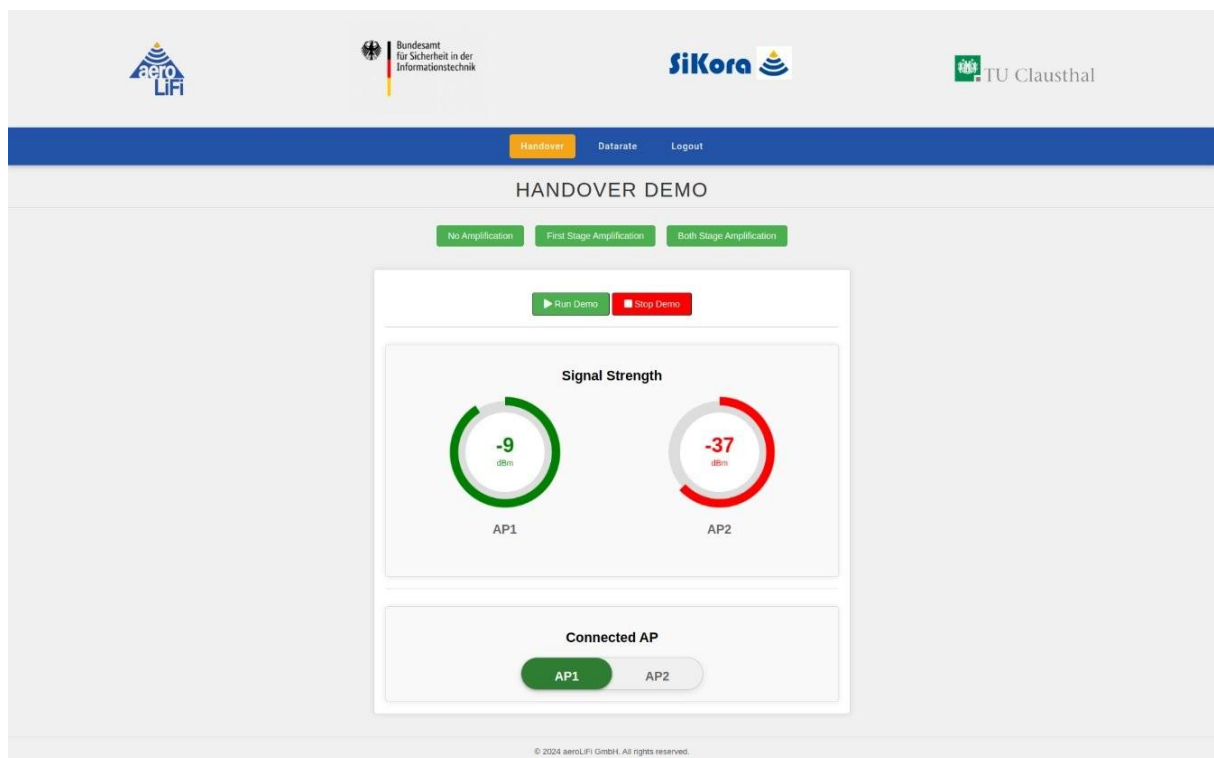


Abbildung 15: Demo-Dashboard mit signalstärkebasierter Übergabe

Demo 3 konzentrierte sich auf die adaptive Verstärkungsregelung über den Steuerkanal. Die Signalstärke wurde bei zunehmender Entfernung sowohl mit einstufiger als auch mit vollständig zweistufiger Verstärkungskonfiguration gemessen. Die in Abbildung 16 visualisierten Ergebnisse zeigten eine konstante Lücke in der empfangenen Signalleistung, wobei die zweistufige Verstärkung die nutzbare Reichweite deutlich erweiterte. Die Steuerschnittstelle ermöglichte die Echtzeitauswahl zwischen den beiden Modi – Energieeinsparung auf kurze Distanz oder maximale Reichweite bei Bedarf. Dies bestätigte die Echtzeit-Anpassbarkeit optischer Verbindungen für energieeffiziente Systeme.

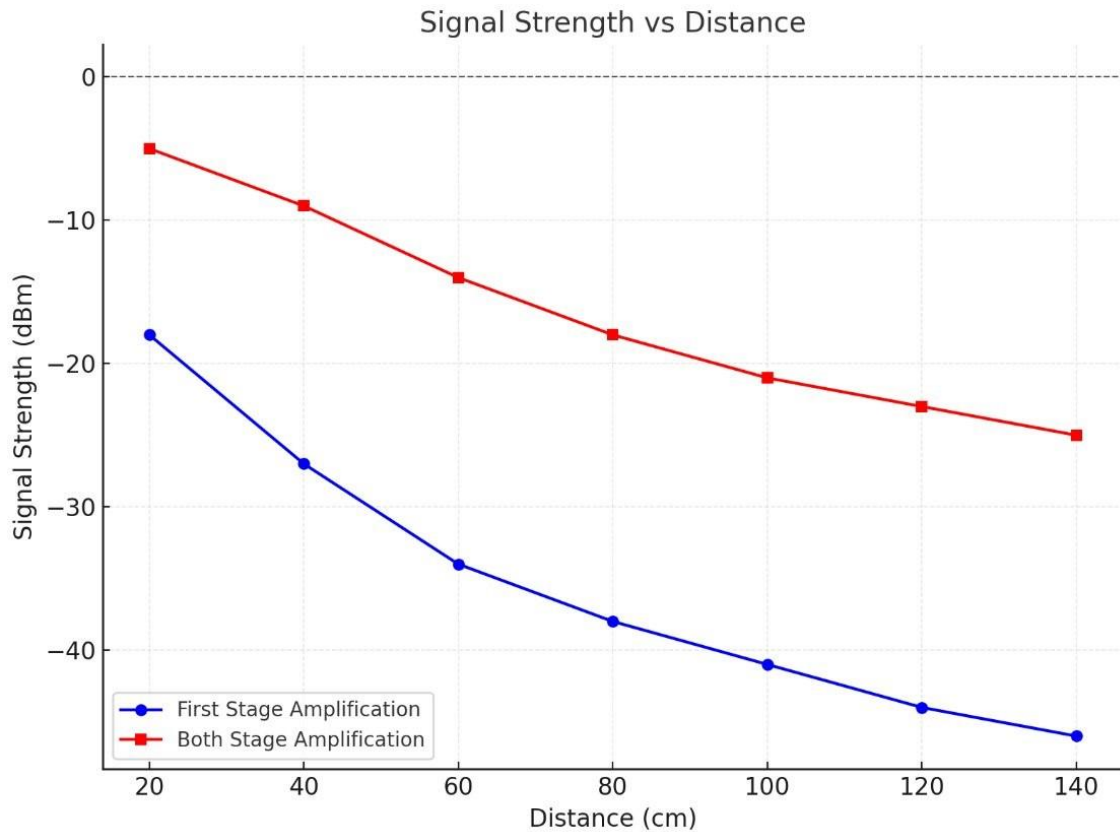


Abbildung 16: Signalstärke vs. Entfernung für verschiedene Verstärkungskonfigurationen

Demo 4 evaluierte den maximalen Datendurchsatz des Systems mit einer sehr hohen Abtastrate von 15 Millionen Abtastungen pro Sekunde. In dieser Konfiguration wurden mehrere Modulationsverfahren getestet, um ihre Dekodierungsschwellenwerte und Betriebsreichweiten mit zweistufiger Verstärkung zu bestimmen. Das Experiment zeigte, wie sich die Modulationskomplexität auf die Signalstärkeanforderungen und die Reichweite auswirkt und diese auf die erreichbaren Datenraten abbildet.

Modulations-schema	Dekodierbar-keitsschwelle (dBm)	Dekodierbar-keitsdistanz (cm)	Maximale äquiv-alente Datenrate (Mbit/s)
BPSK	> -27	<= 140	~15
QPSK	> -24	<= 130	~30
16PSK	> -18	<= 80	~60

Demo 5 testete die Widerstandsfähigkeit des Systems gegen optische Störversuche. Ein externes Gerät, das ein Rauschsignal mit einer Bandbreite von 60 MHz mit der optischen Wellenlänge (850 nm) des Nutzsignals emittiert, wurde in einem 45-Grad-Winkel platziert und die Signalstärke mithilfe verschiedener Signalpegel variiert. Ziel war es, die maximale Entfernung zu messen, in der diese Störung das LiFi-Signal stören könnte.

Die folgenden Ergebnisse wurden beobachtet:

Signalpegel (mV <sub>pp</sub> )	Störabstand (cm)
300	< 22 cm
500	< 27 cm
700	< 30 cm

Diese Ergebnisse unterstrichen die inhärente räumliche Begrenztheit und Belastbarkeit der LiFi-Kommunikation. Trotz des Auftretens von starkem optischem Rauschen gewährleistete das System eine zuverlässige Datenübertragung über kritische Störschwellen hinaus und bewies damit seine Robustheit in sicherheitsrelevanten Umgebungen.

Die abschließende Demonstration kombinierte all diese Elemente in einer nahtlosen Präsentation: Echtzeitmodulation, automatische Verstärkungsregelung, Übergabe zwischen RUs, Live-Überwachung und Benutzerinteraktion.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

### aeroLiFi GmbH:

Insgesamt waren verschiedene Entwicklungsingenieure mit den Schwerpunkten Software, Hardware und Systemauslegung im Projekt tätig. Der größte Einzelposten in der Materialbeschaffung war die USRP X300 SDR Plattform. Weiteres Material wurde für kleinere Teile wie z.B. Adapterplatinen und Messaufbauten verwendet.

### TU Clausthal:

Eine wissenschaftliche Mitarbeiterin hat die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben übernommen. Sie wurde durch wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt. Verbrauchsmaterialbudget wurde zur Fertigung von Testplatinen und Demonstratoren verwendet. Es wurden ein XYZ-Verschiebetisch sowie ein Spektrometer zur automatisierten Charakterisierung des ortsaufgelösten Abstrahlverhaltens von LiFi-Transmittern beschafft.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben SiKora adressierte ein zentrales Bedürfnis im Bereich sicherer und störresistenter drahtloser Kommunikation, insbesondere in Umgebungen, in denen funkbasierte Protokolle inhärente Risiken mit sich bringen. Hierzu zählen Szenarien mit Anforderungen an elektromagnetische Emissionsbegrenzung, wie sie beispielsweise in sicherheitssensiblen Institutionen, industriellen Produktionsanlagen, medizinischen Einrichtungen oder im Transportwesen auftreten.

Von Beginn an war das Projektziel darauf ausgerichtet, zu demonstrieren, dass durch optische Übertragung – insbesondere mit LiFi – eine sichere, lokal begrenzte drahtlose Kommunikation

möglich ist. Die physikalische Begrenzung des Ausleuchtungsbereichs sowie die inhärente Richtwirkung sollten genutzt werden, um Kommunikationszonen klar abzugrenzen und gleichzeitig eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Jamming-, Abhör- und Spoofing-Angriffen zu gewährleisten.

Um diese Ziele zu erreichen, entschied sich das Projekt bewusst gegen den Einsatz herkömmlicher proprietärer Basisband-Chipsätze und verfolgte stattdessen einen softwaredefinierten, offenen Architekturansatz. Die Verwendung von Software Defined Radios (SDRs) als Grundlage der Distributed Unit (DU) ermöglichte eine flexible, rekonfigurierbare und quelloffen-kompatible Basisbandverarbeitung. In Kombination mit den optischen Radio Units (RUs) konnte eine fein abgestimmte räumliche Steuerung und eine sichere physikalische Schicht realisiert werden.

Dieser Ansatz war sowohl aus technischer als auch strategischer Sicht notwendig und angemessen. Zum Zeitpunkt des Projektstarts waren am Markt verfügbare LiFi-Systeme stark von proprietären Lösungen abhängig – etwa auf Basis von MaxLinear-Chipsätzen – wodurch sowohl die Flexibilität als auch die Einbindung neuer Sicherheitsmechanismen stark eingeschränkt war. Durch den gewählten modularen Aufbau und die Orientierung an Open-RAN-Prinzipien wurde die Grundlage für zukünftige Interoperabilität, Anbieterunabhängigkeit und langfristige Weiterentwicklung geschaffen.

Die im Projektverlauf erbrachten Arbeiten zeichneten sich durch ein ausgewogenes Vorgehen aus, das gleichermaßen wissenschaftliche Tiefe und praxisnahe Relevanz berücksichtigte. Von der Definition der Systemarchitektur über die Auswahl der Komponenten bis hin zur softwareseitigen Implementierung und Integrationstestung wurde jeder Meilenstein methodisch fundiert und zielgerichtet umgesetzt.

Auch die Ressourcennutzung und Aufgabenverteilung zwischen den industriellen und akademischen Partnern war zweckmäßig. Die Herausforderungen der domänenübergreifenden Integration – aus den Bereichen Optik, Elektronik, Netzwerktechnik und Embedded Systems – wurden durch interdisziplinäre Zusammenarbeit und agile Anpassung effizient gemeistert.

Die Notwendigkeit der Arbeiten zeigte sich darüber hinaus auch im Kontext übergeordneter strategischer Zielsetzungen: Das Projekt unterstützte aktiv das politische Ziel der technologischen Souveränität, indem es ein Demonstratorsystem entwickelte, das vollständig auf proprietäre internationale Chipsätze verzichtete und stattdessen auf offene, dokumentierte Schnittstellen setzte.

Zusammenfassend waren Umfang, Tiefe und interdisziplinäre Ausrichtung der geleisteten Arbeiten in vollem Einklang mit den Projektambitionen sowie den Zielsetzungen der Förderinstitution. Die durchgeführten Maßnahmen waren erforderlich, um bestehende technologische Abhängigkeiten zu reduzieren, sichere modulare Architekturen zu ermöglichen und die technische Machbarkeit softwaredefinierter, optisch gestützter Sicherheitszonen zu demonstrieren.

## **4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit**

Die im Projekt SiKora entwickelten Technologien eröffnen ein breites Spektrum an zukünftigen Anwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten, sowohl in der Industrie als auch in der Forschung.

Auf industrieller Ebene bieten die erreichten Ergebnisse ein hohes Potenzial für den Einsatz in sicherheitskritischen oder störanfälligen Umgebungen, in denen klassische funkbasierte Kommunikation nur eingeschränkt oder gar nicht möglich ist. Beispiele hierfür sind industrielle Fertigungsanlagen mit hoher elektromagnetischer Belastung, maritime Anwendungen mit komplexen Reflexionsbedingungen, medizinische Einrichtungen mit hohen Anforderungen an Vertraulichkeit und

elektromagnetische Verträglichkeit sowie Reinräume oder Labore, in denen eine gezielte Zonenkontrolle ohne Verkabelung notwendig ist.

Das entwickelte DU-RU-System erlaubt durch seine modulare Architektur und softwarebasierte Verarbeitung eine einfache Anpassung an unterschiedliche Einsatzszenarien. Die Verwendung von Software Defined Radios (SDRs) und offenen Schnittstellen sichert langfristige Flexibilität und ermöglicht eine problemlose Integration in zukünftige 6G-Forschungsvorhaben oder industrielle Pilotinstallationen. aeroLiFi arbeitet bereits an darauf aufbauende Entwicklungen für Demonstratoren für kundenspezifische Anwendungen in sicherheits- und energieoptimierten Umgebungen.

Aus wissenschaftlicher Sicht schafft das Projekt eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungsvorhaben, insbesondere im Bereich softwaredefinierter optischer Übertragungssysteme, der sicheren physikalischen Schichtkommunikation sowie intelligenter Ressourcensteuerung in LiFi-Netzen. Mehrere Komponenten des Systems – einschließlich Steuerkanal, Übergabeprotokolle und adaptive Verstärkungsregelung – sind als Open-Source-taugliche Softwaremodule konzipiert worden und können in zukünftigen Forschungsprojekten weiterentwickelt oder veröffentlicht werden.

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse bereits für den wissenschaftlichen Nachwuchs und die Öffentlichkeitsarbeit genutzt. Die TU Clausthal hat das entwickelte System unter anderem im Rahmen der Kinder-Sommer-Uni, des Girls' Day, bei „TU Connect“ sowie bei der „Langen Nacht der Wissenschaft“ als anschauliches Beispiel aktueller Forschung präsentiert. Dies trug maßgeblich zur Sichtbarkeit der Forschung und zur Nachwuchsgewinnung im Bereich Kommunikationstechnologien bei.

aeroLiFi hat das Projekt auf der Aircraft Interiors Ausstellung 2024 in Hamburg und der BSI-Veranstaltung im November 2024 in Dresden vorgestellt. Darüber hinaus wird das Projekt im Rahmen der 6G-Konferenz im Juli 2025 in Berlin gezeigt.

Insgesamt schafft das Projekt SiKora eine belastbare technologische Grundlage für sichere, zonenbasierte Kommunikationslösungen und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur digitalen Souveränität, zur industriellen Innovation und zur akademischen Bildung.

## **5. Fortschritt bei anderen Stellen**

Im Verlauf des Projekts wurde die internationale Forschungslandschaft im Bereich LiFi und optische drahtlose Kommunikation kontinuierlich beobachtet. Zum Zeitpunkt dieses Berichts konnten keine direkt vergleichbaren Implementierungen identifiziert werden, die ein vollständig softwaredefiniertes Architekturkonzept auf Basis von SDRs mit einer modularen Trennung von Distributed Unit (DU) und optischer Radio Unit (RU) sowie einem parallelen Steuerkanal für LiFi-Frontends kombinieren.

Zwar beschäftigen sich verschiedene Forschungsgruppen und Unternehmen mit der Entwicklung von LiFi-Systemen, jedoch basieren viele dieser Lösungen weiterhin auf proprietären Chipsets und bieten nur begrenzte Offenheit und Programmierbarkeit. Ein erkennbarer Trend in der Fachliteratur ist die zunehmende Hinwendung zu VCSEL-basierten Sendern, die im Vergleich zu LEDs höhere Modulationsbandbreiten ermöglichen. Diese Technologien bringen jedoch neue Herausforderungen mit sich, etwa in Bezug auf Laserschutzvorschriften, enge Strahlcharakteristiken und komplexe optische Justage. Das Projekt SiKora entschied sich daher bewusst für LED-basierte Ansätze, um eine breitere Abdeckung, geringere Komplexität und bessere industrielle Integrierbarkeit zu gewährleisten.

Bemerkenswert ist zudem, dass die im Projekt SiKora gewählten Architekturprinzipien und die erzielten Ergebnisse bereits Einfluss auf parallele Forschungsvorhaben genommen haben. So hat die Technische Universität München im Rahmen des BMBF-Flaggschiffprojekts 6G-life begonnen, an vergleichbaren Architekturen für LiFi-Systeme auf SDR-Basis zu arbeiten. Diese Entwicklung wurde explizit durch das im Projekt SiKora demonstrierte offene DU/RU-Konzept angestoßen und zeigt, dass modulare, softwaredefinierte optische Kommunikationsplattformen zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Damit kann SiKora als ein früher und wirkungsvoller Impulsgeber für Architekturansätze betrachtet werden, die mittlerweile auch im nationalen 6G-Forschungsumfeld aufgegriffen werden.

## **6. Erfolge und geplante Veröffentlichungen**

Erfolgt:

- V. Johny und N. Neumann: Bandwidth Estimation for Electro-Optical Transceivers using Overdetermined System of Equations. Photonische Netze 2025, Berlin.

Geplant:

- Verwendung der Projektergebnisse in der Dissertation der wissenschaftlichen Mitarbeiterin.
- Veröffentlichungen gemeinsamer Ergebnisse in einem Journal (z.B. Journal of Optical Communications and Networking)