Sachbericht zum Verwendungsnachweis
Teil II
2024

Verbundvorhaben

RIS4NGWB

Resilienz und Security im Next Generation Wireless Backhaul mit Rekonfigurierbaren Intelligenten Oberflächen

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

Konsortialführung: **TU Clausthal** **Institut für Elektrische Informationstechnik** **Herr Prof. Dr. Niels Neumann** **Adolf-Roemer-Str. 2a** **38678 Clausthal-Zellerfeld** **+49 5323-72 3530** **niels.neumann@tu-clausthal.de**	Förderkennzeichen: **01MO23001A-C**
Laufzeit des Vorhabens: von: **01.01.2023** bis: **31.12.2024**	
Berichtszeitraum: von**: 01.01.2023** bis: **31.12.2024**	Datum: **27.06.2025**

Projektpartner:

1. Technische Universität Clausthal
2. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
3. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS)

Teil II:

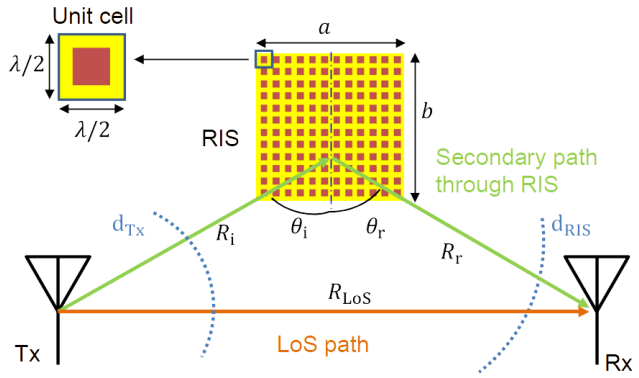
1. Aufgabenstellung

AP1: Anwendungsszenarien und Anforderungen
Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollte im Konsortium die Abstimmung zu einem Beispielszenario (Abbildung 1) erfolgen, das in den nachfolgenden Arbeitspaketen bearbeitet wird. Dazu waren möglichen Anwendungsszenarien zu identifizieren und detailliert zu beschreiben. Flankierend sollte eine Recherche durchgeführt und die technischen (und ggf. auch ökonomische) Leistungskennzahlen identifiziert werden. Mit der Auswahl eines Beispielszenario mit hoher thematischer Relevanz sollten die Ziele des Projekts demonstrierbar gemacht werden.
Für die Auswahl des Beispielszenario wurde eine Studie über potenzielle Anwendungsfälle durchgeführt, die vom Einsatz eines RIS zur Unterstützung des Backhaul eines Mobilfunknetzes profitieren können. Dazu erfolgte in einem ersten Schritt eine umfassende Analyse.
Dabei wurden für das Projekt drei verschiedene Anwendungsfälle identifiziert:

1. Wiederherstellungspfad für gestörte Direktverbindungen:
Es wird eine Verdichtung innerhalb der RANs ist benötigt, um die exponentiell steigenden Anforderungen an die Datenraten in Mobilfunknetzen zu unterstützen. Je nach Standort kann jedoch ein kabelgebundenes Backhauling für die Herstellung einer Verbindung zu solchen neuen Zugangspunkten nicht praktikabel sein. Um diese Herausforderung zu bewältigen, kann anstelle einer kostspieligen Neueinrichtung des drahtlosen Backhaul-Netzes ein RIS eingesetzt werden, um eine „virtuelle“ LOS-Verbindung (LOS steht für Line of Sight) als Backup zu schaffen und so mögliche Störungen zu umgehen. Für den Fall, dass die primäre Verbindung durch ein Naturereignis unterbrochen wird, ist ein spezielles Design der Strahlenmuster an Transmitter und RIS erforderlich. Darüber hinaus kann ein RIS bei einer geplanten Änderung der Umgebung eine wesentlich kostengünstigere Alternative sein, um zu gewährleisten, dass die drahtlose Backhaul-Verbindung bestehen bleibt, im Vergleich dazu, wenn das Netz neu aufgebaut werden müsste.

2. Temporäre Kapazitätserweiterung:
Viele organisierte Veranstaltungen, z. B. Sport- und Kulturveranstaltungen, und die Bewältigung von Naturkatastrophen erfordern eine vorübergehende Erhöhung der End-to-End-Systemkapazität. Bei einem möglichen Ansatz werden Mikro- und Nanozellen eingesetzt, um die erhöhte Nachfrage zu befriedigen. Diese Lösung ist jedoch kostenintensiv und je nach Situation möglicherweise gar nicht durchführbar. Der Einsatz von RIS ermöglicht eine kosteneffiziente Lösung zur Erhöhung der Kapazität, indem zusätzliche Backhaul-Verbindungen zu nicht direkt zugänglichen Basisstationen bereitgestellt werden. In diesen besonderen Situationen können leichte und kleine RIS an Drohnen oder anderen Luft- oder Roboterplattformen genutzt werden. Dies ermöglicht eine einfache und flexible Lösung zur Netzerweiterung.

3. Sicherheit auf der physikalischen Ebene:
Viele unternehmenskritische Anwendungen erfordern eine sichere Kommunikation. Im Falle der Funkkommunikation wird dies in den höheren Schichten des Kommunikationsstapels, typischerweise der Darstellungsschicht oder Anwendungsschicht, d. h. den Schichten 6 und 7 des OSI-Modells, durch Verschlüsselung erreicht. Die Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens und der Quantencomputer können jedoch dazu führen, dass rechnergestützte Verschlüsselungsverfahren wie das RSA-Kryptosystem veraltet oder ineffizient werden. Um dieses Problem anzugehen, besteht ein möglicher Ansatz zur Steigerung der Sicherheit darin, das Kommunikationsmedium selbst für die Sicherheit zu nutzen, d. h. Sicherheit auf der physikalischen Ebene. Bei der drahtlosen Kommunikation kann dies durch die Ausnutzung des Mehrwegekanals und die Anwendung einer geeigneten Vorcodierung der übertragenen Daten erreicht werden. Bei einem solchen Ansatz wird in einem RIS-gestützten Backhaul-System das Strahlenmuster des RIS so abgestimmt, dass es das übertragene Signal für den legitimen Empfänger konstruktiv reflektiert, während es für die Abhörer destruktiv blinde Zonen schafft. Selbst wenn ein Abhörer in der Lage ist, sich zwischen den legitimen Transceivern des Backhaul-Systems zu positionieren, können daher keine Informationen extrahiert werden.
Für das Demonstrations-Arbeitspaket des Projekts hat sich das Konsortium für die Usecases 1 und 3 entschieden, da sie zwei Anforderungen an den Backhaul moderner Mobilfunksysteme unabhängig von besonderen Situationen aufzeigen.



Tx	Backhaul Sender
Rx	Backhaul Empfänger
RIS	Rekonfigurierbare Intelligente Oberfläche
Unit Cell	Einheitszelle des RIS
R_i	Abstand Tx – RIS
R_r	Abstand RIS – Rx
R_{LOS}	Abstand Tx - Rx
a, b	Dimensionen des RIS
Θ_i, Θ_r	Einfalls- und Reflexionswinkel am RIS
d_{Tx}	Fernfeldabstand des Tx
d_{RIS}	Fernfeldabstand des RIS

Abbildung 1: Beispielszenario und relevante Größen

Als nächster Schritt wurden für zwei unterschiedliche Szenarien (Demo-Szenario für die experimentelle Umsetzung im Vorhaben und realitätsnahes („Real Life“) Szenario für eine zukünftige Anwendung und Simulation im Vorhaben) die Systemparameter zusammengetragen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Systemparameter für die Projekt-Szenarien

PARAMETERS OF EXAMPLE REAL-LIFE AND DEMO SCENARIO 1 APPLICATION SCENARIOS

Parameters	Real-Life Application	Demo Scenario 1
Operation frequency	28 GHz	28 GHz
P_{Tx}	14 dBm	24 dBm
G_{Tx}	40 dBi	15 dBi
G_{Rx}	48 dBi	15 dBi
Total noise power of Rx	-54 dBm	-60 dBm
Desired SNR	$\geq$10 dB	$\geq$10 dB
R_i	2 km	8.5 m
R_r	2 km	8.5 m
θ_i	60°	60°
θ_r	60°	60°
Tx / Rx scan angle	$(-60°, 60°)$	$(-60°, 60°)$

Da die Parameter miteinander verknüpft und teilweise bereits festgelegt sind, wurden die Einflussfaktoren auf die noch als Designfaktor verfügbare Größe des RIS untersucht (Abbildung 2).

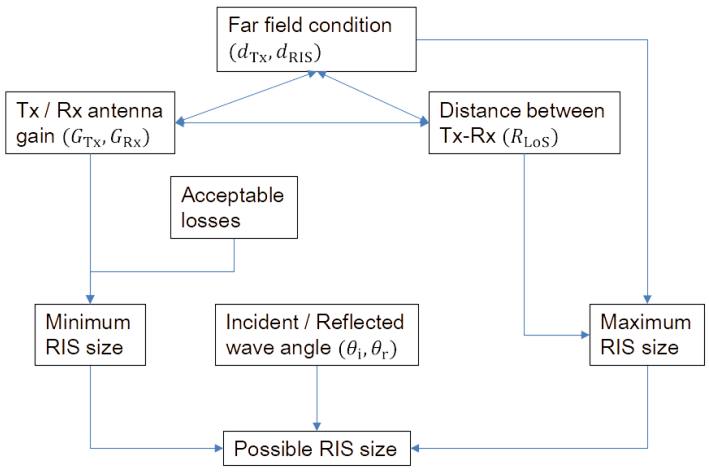


Abbildung 2: Einflussfaktoren auf die RIS-Größe

AP2: Systemarchitektur und Gesamtszenario

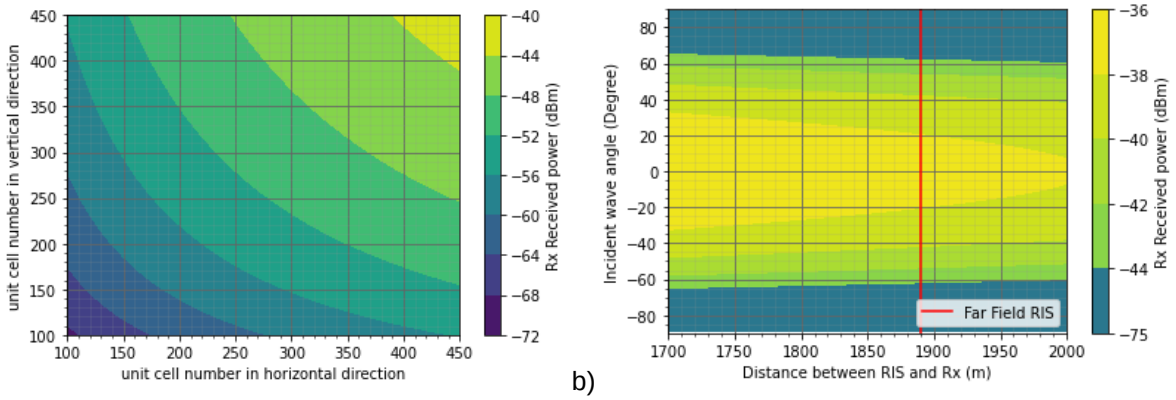
In diesem Arbeitspaket soll die notwendige Konzeptarbeit auf der Ebene des Gesamtsystems einschließlich der HF-technischen Beschreibung der Übertragungsketten und der IT-technischen Darstellung des ansteuernden SDN-basierten Netzwerk durchgeführt werden. Dabei beginnt der erste Arbeitsschritt mit der Erstellung eines Modells des Gesamtszenarios für die Simulation. Im darauffolgenden Arbeitsschritt erfolgt die Beschreibung der Geometrie und des Kanalmodells, die Modellierung aller relevanten Teile der Übertragungsketten für die Simulation. Der nächste Arbeitsschritt umfasst die Modellierung der vom RIS erzeugten Beam-Charakteristiken unter der Berücksichtigung von praktischen Hardware-Limitationen für die Simulation, Optimierung der RIS-Konfigurationen mit Hilfe von konventionellen sowie datengetriebenen Methoden. Der letzte Arbeitsschritt umfasst die Beschreibung des RIS mit einer Netzwerkschnittstelle als Ressource im SDN und die Definition der Architektur des SDN. Erweitert wird diese mit der Definition und Abschätzung der Auswirkungen der neuen Schnittstelle auf Sicherheit und Resilienz.

Dazu wurde in diesem Arbeitspaket für den ersten Arbeitsschritt die Konzeptualisierung und Modellierung einer End-to-End-Systemarchitektur einschließlich detaillierter Funkübertragung vorgesehen. In einem ersten Schritt wurde das mathematische Modell der Beamforming-Eigenschaften eines RIS erweitert, um weitere informative physikalische Eigenschaften einzubeziehen. Diese waren zu diesem Zeitpunkt weder in der Literatur noch im aktuellen Stand der Technik verfügbar.

Diese betrachtete Liste der Eigenschaften umfasst:

- Größe der Unit-Cell
- Abstände zwischen den einzelnen Unit-Cells
- Dimensionen der RIS-Oberfläche
- Anzahl und Verteilung der RIS-Elemente
- Signalfrequenz und -bandbreite

Die RIS-Größe wurde mit den Parametern und identifizierten Zusammenhängen aus AP1 für beide Szenarien ermittelt. Bewertungskriterium war dafür die empfangene Leistung (Rx). Die dafür verwendeten Parameteruntersuchungen sind in Abbildung 3 dargestellt, die Ergebnisse in Tabelle 2.



a) b)

Abbildung 3: a) Beziehung zwischen der Größe der RIS-Einheitszelle und der empfangenen Leistung am Rx in einer realen Anwendung, b) Beziehung zwischen der empfangenen Rx-Leistung, der Änderung des einfallenden Wellenwinkels und der Änderung des Abstands zwischen RIS und Rx für ein RIS-Design mit 420x420 Einheitszellen

Tabelle 2: RIS-Eigenschaften für verschiedene Szenarien

	Realitätsnahes Szenario	Demo-Szenario	Mobiles RIS
RIS-Größe	210x210 cm	10x10 cm	30x30 cm
Anzahl der Elemente (dicht)	176.400	400	3600
Anzahl der Elemente (sparse)	44100	100	900
Fernfeldentfernung	1890 m	4.3 m	38.5 m
Beschränkungen der RIS-Größe	Fernfeld, EIRP	Fernfeld, EIRP, Zahlen der Einheitszellen	RIS Größe, RIS-Gewicht, Fernfeld

Aus den Ergebnissen wurden folgende Schlüsse gezogen:

- bei großen RIS ist es nicht realistisch, alle Elemente steuerbar zu machen, also muss ein „Sparse RIS“-Konzept verfolgt werden
- weniger (steuerbare) Elemente führen aber zu einer Performanceverschlechterung

- daher sind Untersuchungen zu einer optimalen Balance zwischen RIS-Performance, Anzahl der Elemente und deren Positionierung notwendig

Nach dem Erstellen des mathematischen Modells erfolgte ein Vergleich mit der an der TU-Clausthal durchgeführten numerischen FEM-Simulation. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abbildung 4 dargestellt.

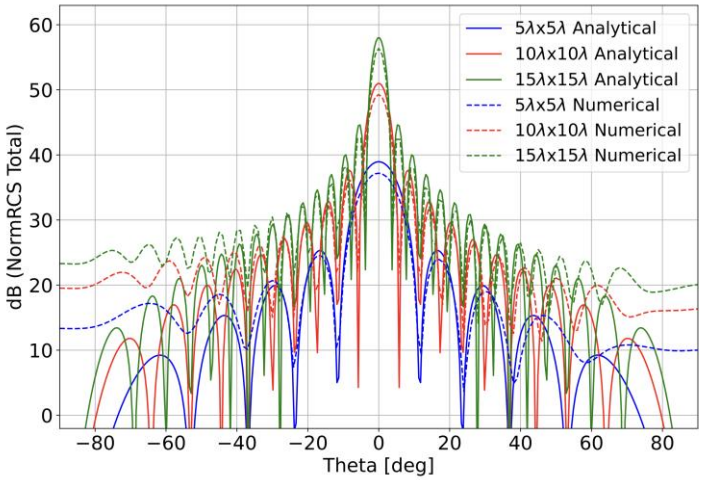


Abbildung 4: Vergleich zwischen dem abgeleiteten analytischen Modell und der numerischen FEM-Simulation

Unter Berücksichtigung der Einschränkungen, die sich aus den für die Formulierung des analytischen Modells erforderlichen Annahmen ergeben, konnte in diesem Fall eine zufriedenstellende Übereinstimmung für die weiter Verwendung in der End-to-End-Simulation erzielt werden. Es konnten gut funktionierende Konfigurationen mit einer um 75% reduzierten Zahl der steuerbaren Elemente gefunden werden. Dieses Konzept wurde dann für die Realisierung genutzt. Außerdem wurde mit den Ergebnissen eine gemeinsame Veröffentlichung aller Partner realisiert.
In einem zweiten Schritt wurde auf der Grundlage des abgeleiteten analytischen Modells eine Simulationsumgebung entwickelt. Diese neu erstellte Simulationsumgebung findet ihren Einsatz in der Analyse des Verhaltens eines RIS unter einer Vielzahl von Konfigurationen und Betriebsbedingungen. Die Simulationsumgebung ermöglicht die Einbeziehung und Variation aller relevanten physikalischen Parameter, die die Leistung von RIS beeinflussen, und ist damit ein wertvolles Instrument sowohl für die akademische Forschung als auch für die praktische Systementwicklung.
Die Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung ist in Abbildung 5 dargestellt. Sie stellt eine dreidimensionale Visualisierung des zu simulierenden Szenarios dar, wobei das RIS-gestützte Netz als Modell dient. Die Simulation wurde unter Verwendung von MATLAB entwickelt und ermöglicht den Einsatz mehrerer RIS-Panels in einem adaptierbaren Szenario. Die Benutzer besitzen damit die Möglichkeit, die Signalausbreitung in komplexen Umgebungen zu simulieren, um den kollektiven Einfluss von RIS auf das Verhalten elektromagnetischer Wellen zu beobachten.

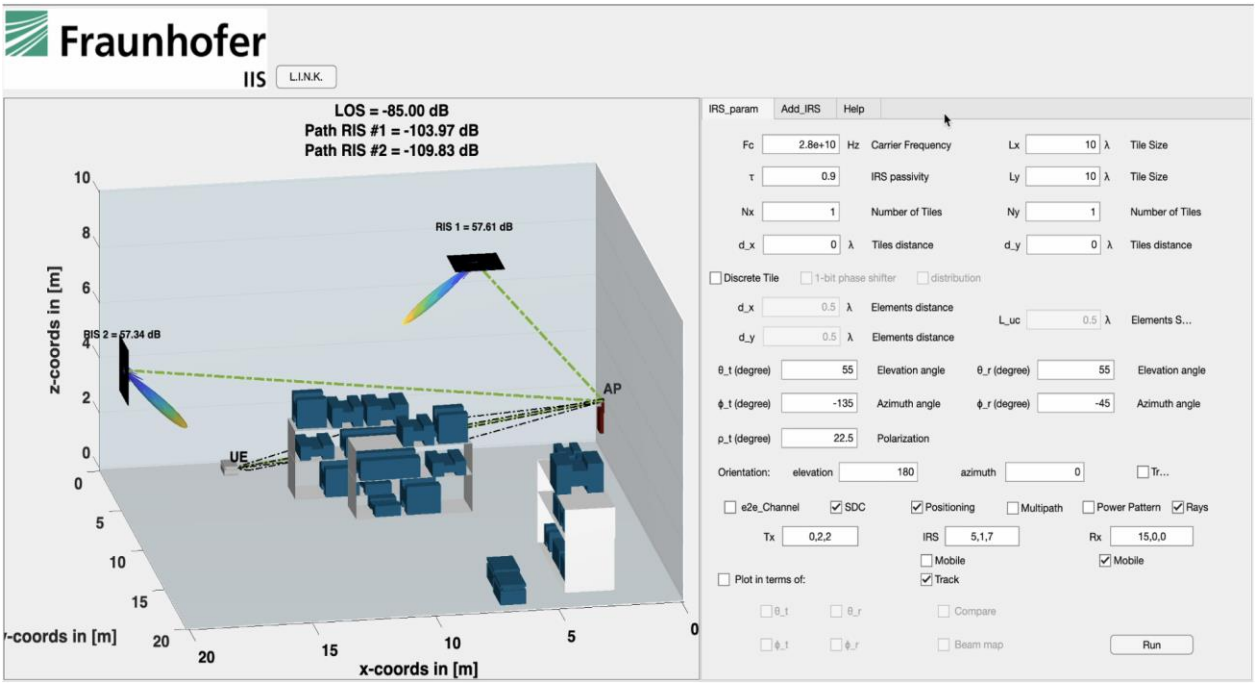


Abbildung 5: Benutzeroberfläche der End-to-End-Simulationsumgebung

Zusätzlich zu den Kernsimulationsfunktionen bietet das neu erstellte Framework mehrere fortgeschrittene Funktionen, die seine analytischen Fähigkeiten verbessern:

1. Mobilität:
   Die Simulation bietet ein vollständig dynamisches Szenario, bei dem das Endgerät und das RIS in Bewegung über vordefinierte Strecken simuliert werden können.
2. Ray Tracing:
   Die Integration mit der Sionna-Bibliothek ermöglicht genaue Ray-Tracing-Simulationen, die eine realistischere Bewertung von Wellenausbreitung und Reflexionen ermöglichen.
3. Modellierung von Mehrwegekanälen:
   Die Simulation berücksichtigt die Mehrwegeausbreitung auf der Grundlage von definierten Kanalmodellen und bietet Einblicke in Interferenzmuster und Signalstärkeverteilungen.
4. Entwurf von Strahlungsmustern:
   Benutzer können benutzerdefinierte Reflektions- und Streustrahlungsmuster definieren und bewerten, um die Systemleistung zu optimieren.
5. Unterstützung der Lokalisierung:
   Das Framework umfasst Module zur Bewertung der Rolle von RIS bei der Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit durch geometrische Optimierung und winkelbasierte Berechnungen.

Die Flexibilität und Modularität des Simulationssystems machen es für verschiedene Anwendungsfälle geeignet, darunter:

1. Entwurf und Test von RIS-unterstützten Kommunikationssystemen.
2. Akademische Forschung zur Wellenmanipulation und Reflexionsoptimierung.
3. Entwicklung von RIS-basierten Lokalisierungsverfahren.
4. Performance-Analyse unter realistischen Mehrwegbedingungen.
5. Unterstützung bei der Herstellung von RIS-Prototypen in der realen Welt: Dank unserer leistungsstarken Simulation haben wir die Entwicklung des von TU Clausthal hergestellten physischen RIS unterstützen können. Dies beweist die Genauigkeit und praktische Relevanz der Simulation in realen Entwicklungs- und Validierungsszenarien.

Neben der Modellierung und Simulation der RIS-Eigenschaften erfolgte in diesem Arbeitspaket die Konzeption des SDN-basierten Netzwerk. Der Kern eines SDN-Systems stellt der SDN-Controller dar. Für die Auswahl eines geeigneten Controllers erfolgte in einem ersten Schritt die Evaluierung verfügbarer Open-Source-SDN-Controller. Dazu wurden verschiedene SDN-Controller wie OpenDaylight,

ONOS, Floodlight oder Ryu bewertet. Bei dieser Untersuchung hat sich herausgestellt, dass die meisten dieser Open Source Projekte eine nur rudimentäre Implementierung realisieren oder deren Entwicklung und Wartung von der jeweiligen Entwicklergemeinde eingestellt wurden. Alleine OpenDaylight stach dabei als die ausgereifteste und aktuell am besten gewartete Implementierung eines SDN-Controllers heraus. Daher wurde OpenDaylight als Controller-Framework für die weitere Nutzung während des Projekts ausgewählt.
Ein SDN-Manager fungiert als Vermittler zwischen dem SDN-Controller und den Knoten des Backhauls. In einem SDN-Netzwerk kommunizieren der SDN-Controller und die Netzelemente über das OpenFlow-Protokoll. Während der SDN-Controller von Natur aus OpenFlow-fähig ist, ist der SDN-Manager eine für das Projekt spezifisch zu entwickelnde Komponente, die mit OpenFlow-Fähigkeit ausgestattet werden muss. Deshalb wählte das Projektteam das Open-Source-Framework Open vSwitch aus, auf dessen Basis der SDN-Manager aufgebaut wurde.
Wie der Projektplan vorsah, wurden auch Lösungsansätze alternative zu Software Defined Networking untersucht. Dazu wurden folgende Technologien evaluiert:

1. NETCONF: NETCONF ist ein standardisiertes Netzwerkmanagementprotokoll (IETF, RFC 6241), das dazu verwendet wird, Netzwerkgeräte (z. B. Routern, Switches) zu konfigurieren, deren Statusinformationen abzufragen, transaktionale Änderungen durchzuführen und Konfigurationsdaten zu beschreiben. Viele SDN-Controller, darunter auch OpenDaylight, unterstützen NETCONF, um Netzwerkgeräte out-of-band zu konfigurieren (z. B. Interfaces, Routing-Parameter, VLANs). OpenDaylight kann zum Beispiel über NETCONF mit Geräten kommunizieren und diese modellbasiert verwalten. NETCONF ist besonders nützlich für das Management von Legacy-Geräten, die keine native SDN-Unterstützung wie OpenFlow bieten, aber Modelle basiert abstrahiert werden können. NETCONF kann also in SDN- Umgebungen unterstützend eingesetzt werden, es vermag aber ein SDN-System nicht zu ersetzen.
2. Network Function Virtualization (NFV): Während SDN die Trennung von Daten- und Steuerungsebene betont, zielt NFV auf die Virtualisierung von Netzwerkfunktionen (wie Firewalls, Load Balancer, etc.) auf Standardhardware ab. Typische Anwendungen sind Virtual Router, vFirewall, vLoadBalancer. SDN bietet flexible Steuerung, während bei NFV die dynamische Bereitstellung von Funktionen im Mittelpunkt steht. Auch NFV kann als eine Ergänzung für SDN eingesetzt werden.
3. Intent-Based Networking (IBN): In IBN beschreibt der Administrator, was das Netzwerk tun soll, nicht wie es dies technisch umsetzt. Dabei werden Automatisierung und KI/ML verwendet, um Netzwerkzustand und Konfiguration dynamisch zu steuern. IBN ist eine Weiterentwicklung von SDN mit höherem Abstraktionsgrad. Die SDN Implementierungen OpenDaylight und ONOS enthalten Module, die IBN unterstützen.
4. Segment Routing / MPLS / Traditional Control Plane: Anstelle von SDN setzen viele Carrier auf Technologien wie MPLS mit traditionellen Routing-Protokollen (OSPF, BGP). Segment Routing (SR) ist eine modernere Form des Source Routings und kann SDN-Funktionalität teilweise ersetzen oder ergänzen. Während diese Technologie interoperabel und stabil ist, zeigt sie sich als weniger flexibel/dynamisch als SDN.
5. Distributed Control Plane: Im Gegensatz zum zentralen SDN-Controller behalten Geräte wie Router/Switches bei dieser Technologie ihre eigene Intelligenz (z. B. mit ISIS/OSPF/BGP). Anbieter wie Cisco, Juniper und andere setzen in klassischen Netzwerken auf diesen Ansatz. Die Nachteile dieser Technologie gegenüber SDN sind, dass sie weniger zentral steuerbar ist und ein komplexeres Verhalten aufweist.
6. P4 (Programming Protocol-independent Packet Processors): P4 basiert auf einer programmierbaren Data Plane. Switches können mit eigener Logik für Paketverarbeitung beschrieben werden. P4 kann als Ergänzung zu SDN eingesetzt werden, da sie tiefergehende Kontrolle über das Verhalten der Switches ermöglicht. Es gibt einen Open Source P4-Compiler für verschiedene Hardware-Switches. Eine Implementierung für eine virtuellen Switch ist ebenfalls verfügbar. Diese ist jedoch nur für Simulations- und Testzwecke gedacht und liegt hinsichtlich der Performanz weit hinter Open vSwitch, der in diesem Projekt eingesetzt wurde.

AP3: RIS-Demonstrator

Um einen RIS-Demonstrator entsprechend des Konzepts aus AP2 realisieren zu können, wurden zunächst die einzelnen zu entwerfenden und aufzubauenden RIS-Module definiert (Abbildung 6). Ein RIS besteht aus reflektierenden Einheitszellen, die in Tiles angeordnet sind und über eine Träger-Leiterplatte (Backplane) von einem RIS-Controller gesteuert werden. Das RIS ist eine SDN-Ressource (Software-Defined Networking) mit RIS-Controller als Schnittstelle über TCP/IP.

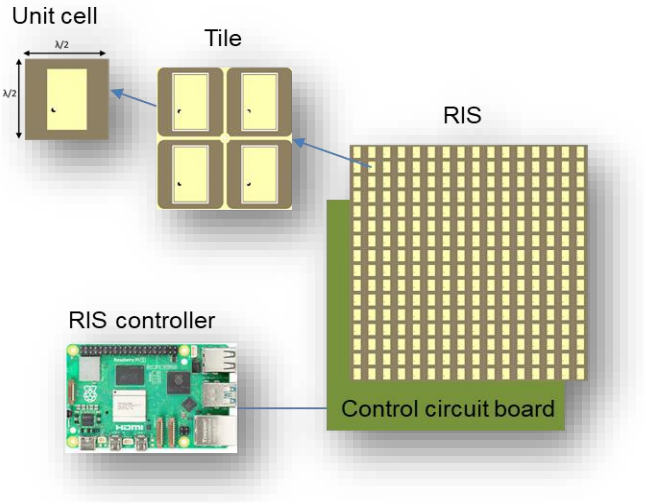


Abbildung 6: Übersicht zu RIS-Modulen

Zunächst wurde die RIS-Einheitszelle (unit cell) entworfen und charakterisiert. Eine RIS unit cell bildet den Kern des RIS und wird als „sparse RIS“ räumlich wiederholt angeordnet. Die notwendigen Designschritte waren: Entwurf, Simulation und Optimierung eines EM-Modells → Erstellung von Fertigungsdaten → Fertigung und messtechnische Charakterisierung (Abbildung 7). Eine zweite Version optimiert das elektromagnetische Verhalten (Abbildung 8). Dieses Design wurde auf einer Konferenz vorgestellt.

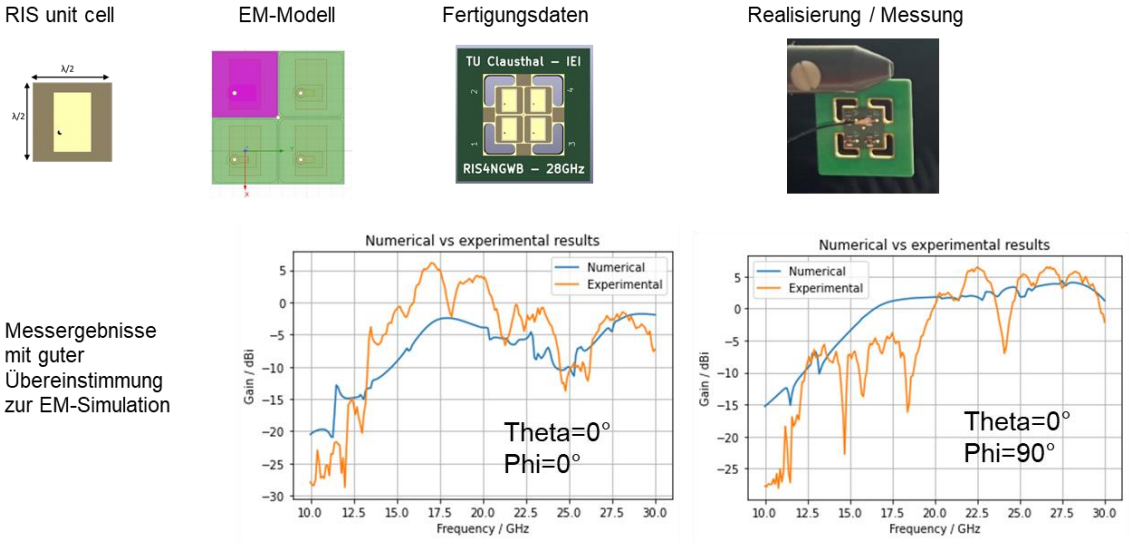


Abbildung 7: Designschritte für die RIS-Einheitszelle

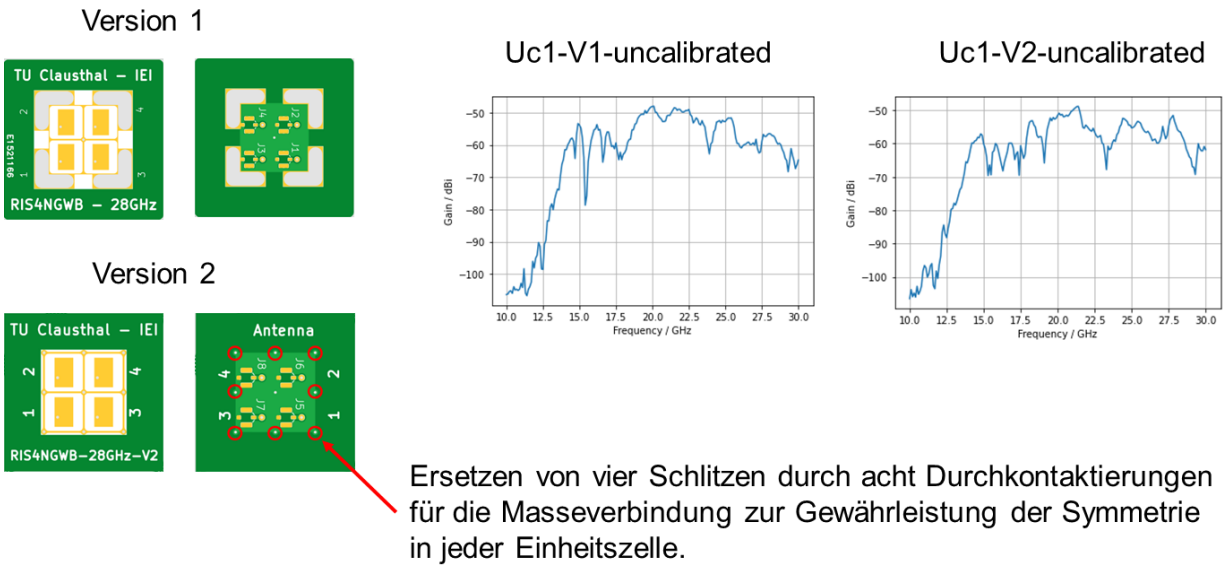
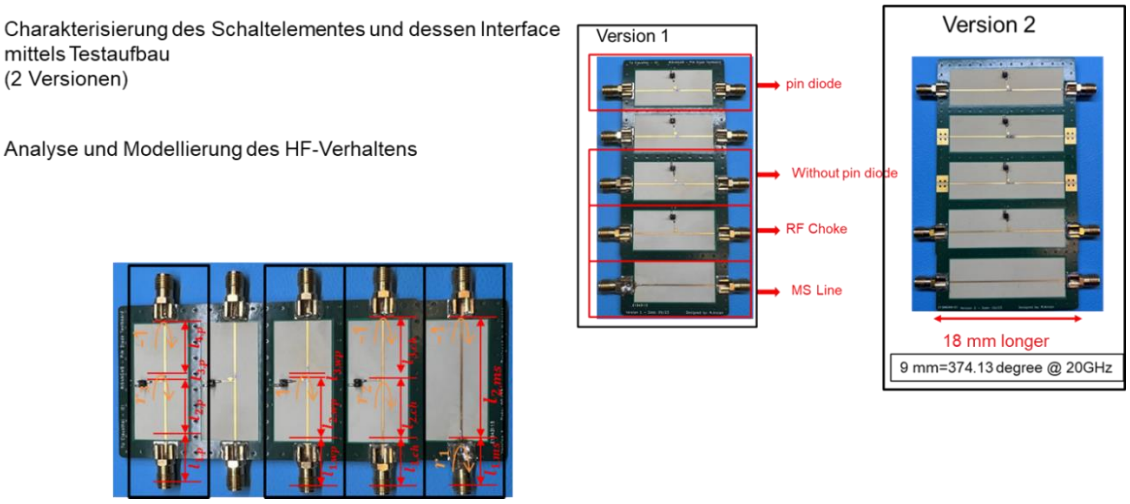


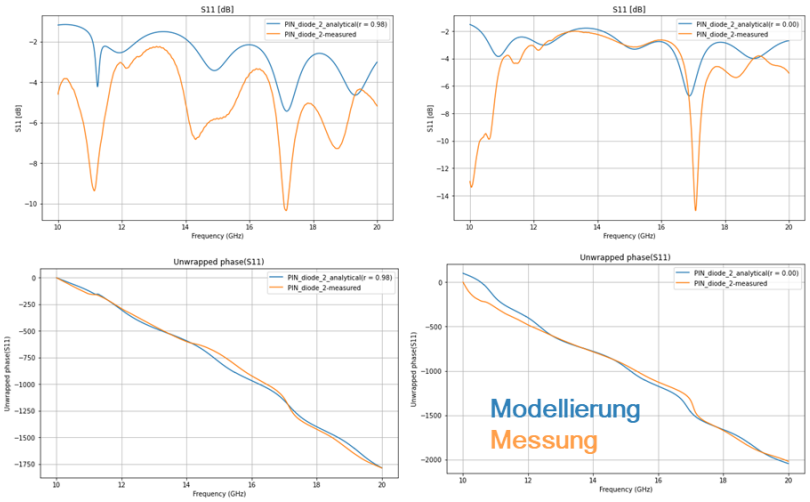
Abbildung 8: Version 1 und Version 2 der RIS-Einheitszelle

Als nächstes muss das Schaltelement für das RIS entworfen werden. Dafür müssen seine Komponenten charakterisiert werden. Eine Diode dient als Schaltelement für das RIS, zunächst mit zwei Zuständen „Leerlauf“ (nicht leitend) + „Kurzschluss“ (leitend), die durch eine DC-Spannung über der Diode eingestellt werden können. Diese Dioden sind nicht direkt messbar, sondern müssen gemeinsam mit ihrer Verschaltung betrachtet und der kabelgebundenen Messtechnik zugänglich gemacht werden. Daher müssen Testaufbauten mit De-Embedding-Funktionalität entworfen, realisiert und charakterisiert werden (Abbildung 9). Dies konnte als Veröffentlichung präsentiert werden.

a)



Extraktion und Modellierung der HF-Parameter des Schaltelements in unterschiedlichen Schaltzuständen (benötigt für RIS-Design und –Betrieb)



b)

Abbildung 9: Charakterisierung des RIS-Schaltelements

Um die schaltbar reflektierende Einheitszelle zu realisieren, werden die RIS-Einheitszelle und das Schaltelement kombiniert, d.h. jede Einheitszelle enthält eine Antenne und ein Schaltungsnetz, das den Reflexionszustand steuert (Abbildung 10).

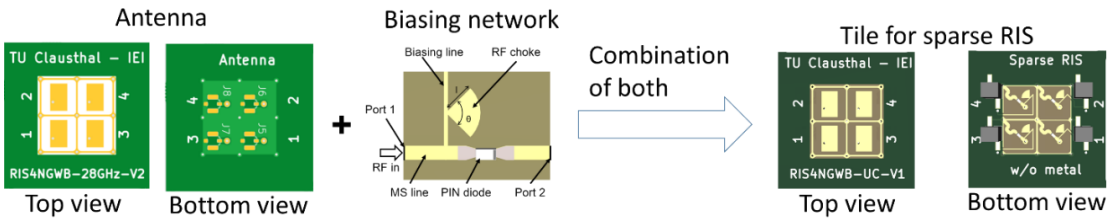


Abbildung 10: schaltbar reflektierende RIS-Einheitszelle

Für „Sparse RIS“ gibt es hier unterschiedliche Möglichkeiten, den Platz ohne reflektierende RIS-Einheitszellen zu nutzen. Dies wurde mit vier unterschiedlichen Designs untersucht. Mit diesen Erkenntnissen und der Verknüpfung mit den Systemeigenschaften erfolgte eine Patentanmeldung gemeinsam mit Fraunhofer IIS.
Um die Zustände der einzelnen Elemente zu steuern und diese mechanisch zu fixieren, wurde eine Trägerleiterplatte (Backplane) entworfen. Diese muss mit dem RIS-Controller (der SDN-Ressource) kommunizieren. Als RIS-Controller wird ein Raspberry Pi genutzt. Dieser hat alle notwendigen Schnittstellen und ist schnell einsatzbereit. Die Kommunikation mit der Backplane erfolgt über die SPI-Schnittstelle des Raspberry Pi und die Datenübertragung über das Daisy Chain Modell.
Aus der Kombination all dieser Module entstand der RIS Demonstrator (Abbildung 11), wobei alle vier Sparse RIS – Realisierungen zu Vergleichszwecken aufgebaut wurden (Abbildung 12). Das RIS arbeitet bei 28 GHz und beinhaltet 20 x 20 unit cells in tiles von 4 x 4 Elementen. Darin sind 2 x 2 steuerbar.

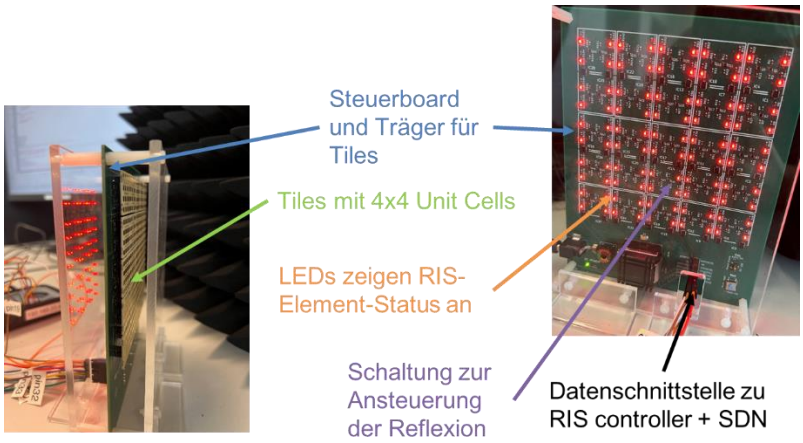


Abbildung 11: RIS-Demonstrator und dessen Module und Schnittstellen

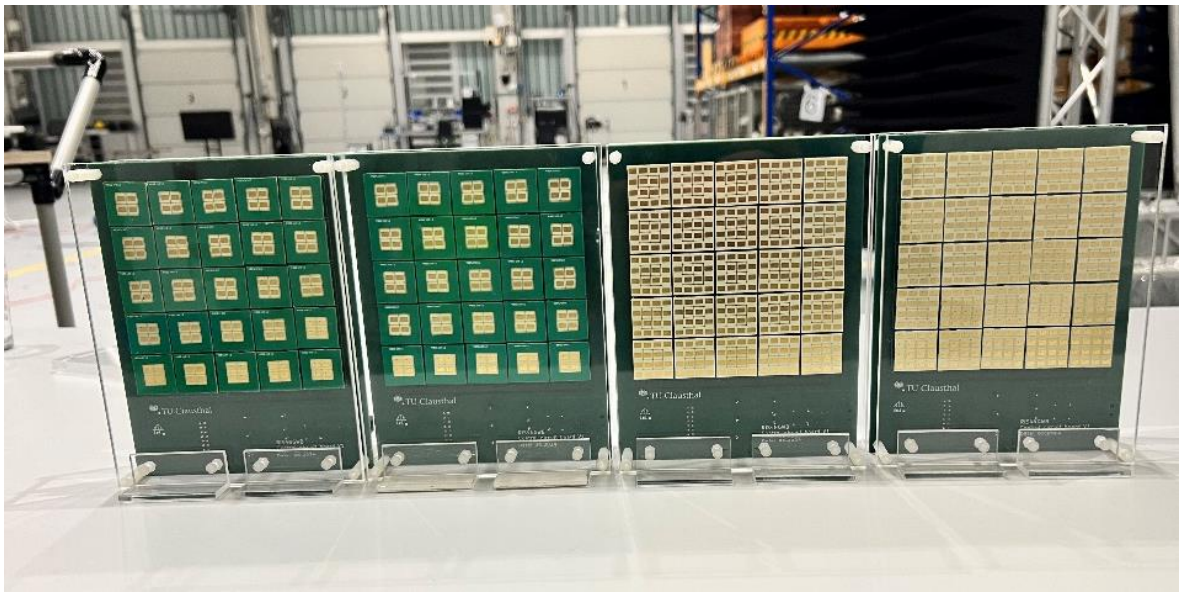


Abbildung 12: vier aufgebaute Varianten des RIS-Demonstrators

AP4: Resiliente und sichere Strategien für RIS-assisted Wireless Backhaul
Im Arbeitspaket 4 zielen wir darauf ab, ein resilientes Protokoll für die drahtlosen Backhaul-Systeme mittels RIS zu entwickeln und gleichzeitig die Anforderungen an die Datensicherheit zu gewährleisten. Insbesondere schlagen wir zunächst ein Two-Time-Scale-Protokoll für Resilienz vor, um die Fähigkeit des Systems zu verbessern, die Funktionalität nach einem Systemausfall aufrechtzuerhalten und wiederherzustellen. Danach untersuchen wir das optimale RIS- und Base-Station- (BS-) Beamforming, um die Kommunikationsleistungsfähigkeit des drahtlosen Backhaul-Systems zu verbessern.

Entwicklung eines Resilienzprotokolls für drahtlose Backhaul-Systeme mittels RIS
Für drahtlose Backhaul-Systeme haben wir eine neue Framestruktur gewählt, wie sie in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Die Anpassung der RIS-Phase-Shifts erfordert eine häufige Kommunikation zwischen BS und RIS, was zu zusätzlichen zeitlichen Verzögerungen und weiteren Overheadkosten führt. Daher ziehen wir ein langfristiges Design von BS-Beamforming und der RIS-Phase-Shifts in Betracht. Andererseits sind die Übertragungskanäle aufgrund möglicher Veränderungen in der Umgebung (z. B. Blockaden, Nutzerbewegungen) über den betrachteten langen Zeitraum T_{LT} nicht konstant. Um dieses Problem zu lösen, unterteilen wir den betrachteten langen Zeitrahmen in T_s kurze Zeitrahmen, während derer die Kanäle als konstant angenommen werden können.

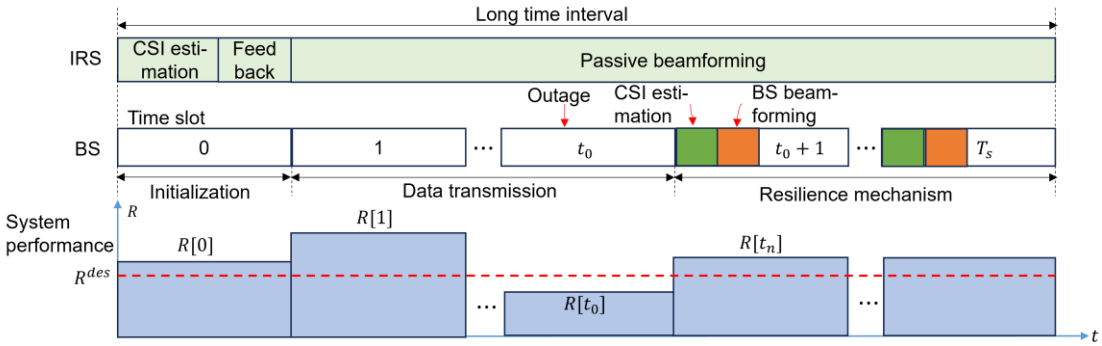


Abbildung 13: Rahmenstruktur des vorgeschlagenen Resilienzprotokolls

In der Systeminitialisierungsphase werden sowohl die BS-Beamforming-Vektoren als auch die RIS-Phase-Shifts optimiert, um das System nach einem Systemausfall im betrachteten langen Zeitrahmen T_{LT} auf dem gewünschten Leistungsfähigkeitsniveau zu halten. Insbesondere schätzt die BS die Kanalzustandsinformation (Channel State Information, CSI) der Kanäle aller legitimen Übertragungen. Zu diesem Zweck senden die Nutzer über das RIS Pilotsignale an die BS, um die Kanalschätzung zu ermöglichen. So ist die BS in der Lage, die genaue CSI der Benutzer für den Initialisierungszeitrahmen zu erhalten. Außerdem gehen wir davon aus, dass die Kanalvariationen im betrachteten langen Zeitrahmen nach oben hin begrenzt sind. Dann optimieren wir gemeinsam die BS-Beamforming-Vektoren und die RIS-Phase-Shifts, um die Worst-Case-Systemleistungsfähigkeit unter den begrenzten Kanalschwankungen zu verbessern. Nach der Systeminitialisierungsphase überwacht das System kontinuierlich die Servicequalität des Netzes, wobei die Benutzer aufgefordert werden, ihre erreichbare Rate an die BS zu melden. Wenn die erreichbare Rate eines Benutzers im Zeitrahmen t_0 unter der gewünschten Rate liegt, wird der BS ein Systemfehler gemeldet. Dann wird eine System-Recovery-Srategie aktiviert, um die Systemleistungsfähigkeit wiederherzustellen. Insbesondere schätzt die BS die effektiven Kanalvektoren zwischen BS und Nutzern neu, die niedrigdimensional sind und von der BS genau geschätzt werden können. Dann werden die BS-Beamforming-Vektoren auf der Grundlage der neu geschätzten effektiven Kanalvektoren angepasst.
Als Nächstes berücksichtigen wir die Sicherheitsanforderungen im vorgeschlagenen Resilienzprotokoll. In diesem Projekt zielen wir darauf ab, Physical-Layer-Security in das BS-Beamforming- und RIS-Phase-Shifts-Design einzubeziehen, vorbei eine geringe Komplexität und eine hohe Effizienz gewährleistet sein soll. Da die potenziellen Evaesdroppers (Eves) jedoch immer versuchen, ihre Anwesenheit vor der BS zu verbergen, kooperieren sie möglicherweise nicht bei der CSI-Erfassung. Daher nutzt die BS die Lecksignale der Eves für die Kanalschätzung, was zu einer unvollständigen CSI-Kenntnis der Eves führt. In der Initialisierungsphase erhält die BS das unvollkommene CSI-Wissen der Eves. Dann optimiert die BS gemeinsam das BS-Beamforming und die RIS-Phase-Shifts, um zu gewährleisten, dass das maximale Informationsleck zu einem Eve R_e unter einem gewünschten Wert R_{th} liegt, d. h. $\max_{CSI} R_e \leq R_{th}$.
Zur Erleichterung des Entwurfs eines resilienten und sicheren Backhaul-Systems mittels RIS führen wir Kennzahlen zur Charakterisierung der Resilienz ein. Resilienz kann durch Absorptions- und Adaptationsleistungsfähigkeit charakterisiert werden, die die Fähigkeit eines Systems widerspiegeln, die Funktionalität aufrechtzuerhalten bzw. wiederherzustellen, wenn Fehler auftreten. Hierzu definieren wir Systemabsorptions- und Adaptationsmetriken als

$$r_{abs} = \frac{R_F}{R^{des}}, und\ r_{ada} = \frac{R_{re}}{R^{des}},$$

wobei R_F und R_{re} die erreichbare Rate des Systems nach einem Systemausfall bzw. nach einem System-Recovery bezeichnen. Im vorgeschlagenen Protokoll werden dann in der Initialisierungsphase die BS-Beamforming-Vektoren und die RIS-Phase-Shifts iterativ mit einer Alternating-Optimization-Technik (AO) optimiert, um die Absorptionsleistungsfähigkeit des Systems zu verbessern, d. h. die im schlechtesten Fall erreichbare Rate bei einer vordefinierten maximal tolerierbaren Leakage Rate, indem die Auswirkungen langfristiger Kanalschwankungen berücksichtigt werden. Wenn das System einen Ausfall feststellt, wird ein schneller Systemwiederherstellungsmechanismus aktiviert, um den Betrieb wiederherzustellen, indem nur die BS-Beamforming-Vektoren angepasst werden, wodurch die Adaptationsleistungsfähigkeit des Systems verbessert wird. Gemäß der folgenden Abbildung, zeigen unsere numerischen Ergebnisse, dass der vorgeschlagene Algorithmus die Systemresilienz, einschließlich der Robustheit des Systems und der Recoveryleistungsfähigkeit, erheblich verbessert. Das entworfene Resilienzprotokoll wurde in einer Veröffentlichung ausführlich beschrieben.

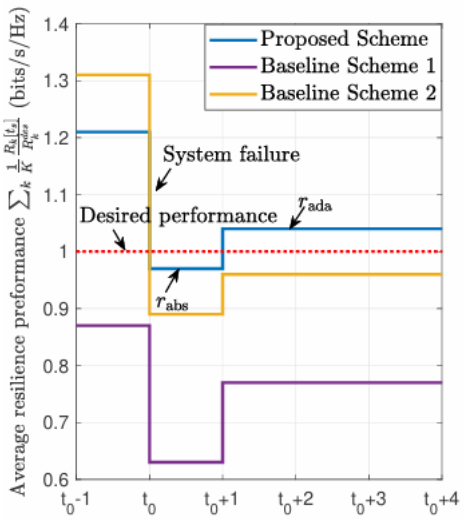


Abbildung 14: Resilientes Verhalten verschiedener Systeme. Systemausfall tritt zum Zeitpunkt t_0 ein.

Global optimaler Entwurf für Mehrbenutzernetze mittels RIS

Um das enorme Potenzial von RISs für resiliente und drahtlose Backhaul-Systeme voll auszuschöpfen, müssen sowohl die Phase-Shift-Konfiguration des RIS als auch das Beamforming an der BS sorgfältig geplant werden. Bei drahtlosen Systemen mit kleinen RISs können die RIS-bezogenen Kanäle in Echtzeit perfekt geschätzt werden. Somit ist die perfekte CSI-Kenntnis in der BS verfügbar. Für diesen Fall untersuchen wir den optimalen Entwurf für RIS-unterstützte Mehrbenutzersysteme mit perfekter CSI. Insbesondere optimieren wir gemeinsam das Beamforming an der Basisstation (BS) und die diskreten RIS-Phase-Shifts, um die Gesamtsendeleistung zu minimieren. Um die global optimale Lösung des formulierten nicht-konvexen kombinatorischen Optimierungsproblems zu erreichen, entwickeln wir einen optimalen Algorithmus mit garantierter Konvergenz, der auf dem Schur Komplement und der Generalized-Bender-Decomposition (GBD) basiert. Unsere numerischen Ergebnisse in der folgenden Abbildung zeigen, dass der vorgeschlagene Algorithmus die BS-Sendeleistung im Vergleich zum suboptimalen, auf AO basierenden Ansatz nach dem Stand der Technik erheblich reduzieren kann. In einer weiteren Veröffentlichung wurde das optimierte Design für perfekte CSI-Kenntnis vorgestellt und umfassend analysiert.

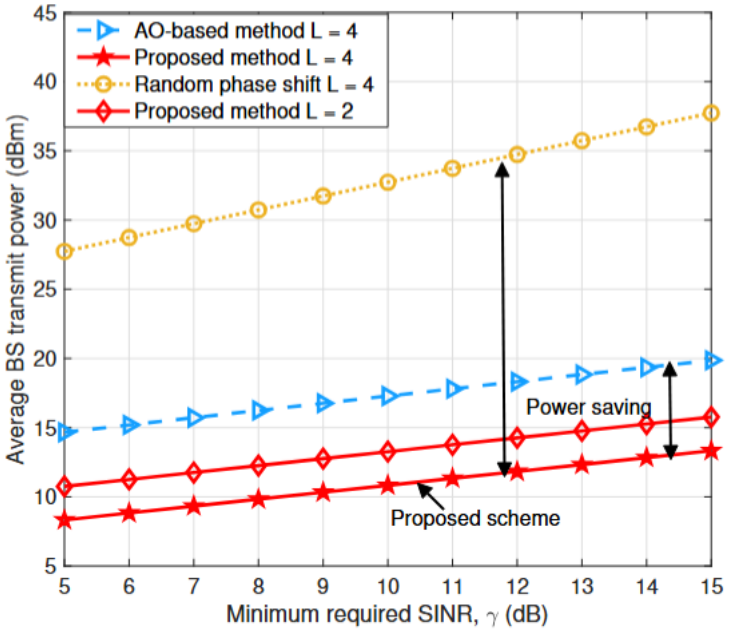


Abbildung 15: Mittlere BS-Sendeleistung als Funktion des minimal erforderlichen SINR bei perfekter CSI.

Andererseits ist bei drahtlosen Backhaul-Systemen mit großen RIS eine perfekte Kanalschätzung aufgrund der erhöhten Kanaldimensionalität eine große Herausforderung. Daher ist die an der BS vorliegende CSI typischerweise imperfekt, wie zuvor in der Schreibung der Systeminitialisierungsphase des

Resilienzprotokolls erwähnt. Um die CSI-Unsicherheit in großen RIS-unterstützten Systemenzu beherrschen, haben wir ein optimales robustes Design für Mehrbenutzersysteme mit RIS und imperfekter CSI entwickelt. Insbesondere optimieren wir die Beamformingsvektoren an der BS und die diskreten RIS-Phase-Shifts gemeinsam, um die Gesamtsendeleistung für den Fall imperfekter CSI-Kenntnis zu minimieren. Darüber hinaus legen wir ein Norm-Bounded-Fehlermodell zugrunde, um die CSI-Unsicherheit zu charakterisieren, und schlagen eine neuartige Transformation vor, um die robusten Dienstgütebeschränkungen (Quality of Service, QoS) in eine konvexe Form zu überführen. Anschließend wurde ein neuartiger Algorithmus auf der Grundlage der GBD entwickelt, um die global optimale Lösung für imperfekte CSI zu ermitteln. Um eine praktische Umsetzung zu erleichtern, schlagen wir außerdem einen entsprechenden suboptimalen Algorithmus mit geringer Komplexität und garantierter Konvergenz vor, basierend auf einer Successive-Convex-Approximation (SCA). Gemäß der folgenden Abbildung bestätigen unsere numerischen Ergebnisse die Optimalität des vorgeschlagenen GBD-basierten Algorithmus für das betrachtete System bei imperfekter CSI. Darüber hinaus zeigt sich, dass der vorgeschlagene SCA-basierte Algorithmus eine lokal optimale Lösung innerhalb weniger Iterationen erreichen kann. Das entwickelte robuste Design wurde in einer Journalpublikation vorgestellt und umfassend analysiert.

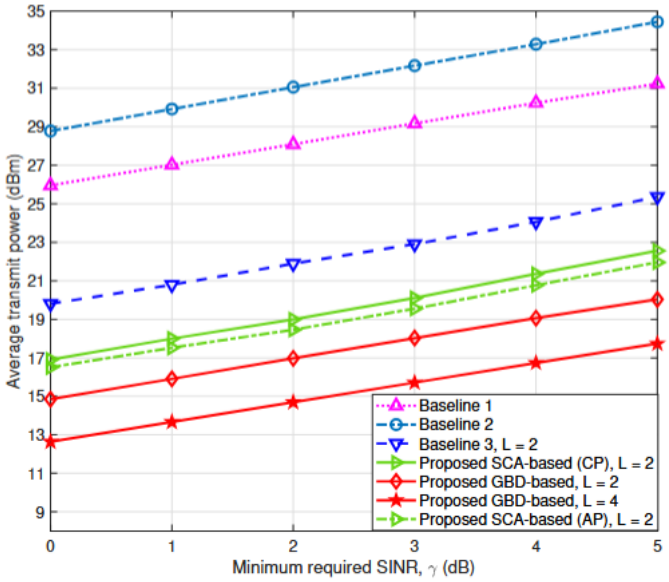


Abbildung 16: Mittlere BS-Sendeleistung als Funktion des minimal erforderlichen SINR bei imperfekter CSI.

Zur Evaluierung dieses an der FAU vorgegebenen Rahmens wurden vom IIS die in AP1 konzipierten Szenarien mittels End-to-End-Simulation und 3D-Umgebung simuliert, wodurch ein Indikator für die erzielbare Leistung generiert werden konnte. Darüber hinaus trug dies zur Übertragung des theoretischen Rahmens und der Ableitung der erforderlichen Anpassungen bei, um diese auf ein laufendes System zu übertragen, einschließlich der Daten, die von der Plattform gemeldet werden, z. B. die Signalisierungs- und Kanalmessungen. Zu diesem Zweck wurden Iterationen der Lösung durchgeführt, in deren Rahmen das Fraunhofer IIS und die FAU eine Verfeinerung der Algorithmen und Strategien vornahmen. In einem darauffolgenden Schritt erfolgte in Kooperation mit der FAU die Gestaltung der Schnittstelle zum SDN-Teil und die technische Umsetzung der ausgewählten Applikationen innerhalb des Systems.
Die Applikationen beeinflussen die Funktionalität des Backhauls, dem Verteilernetz im 5G Radio Access Network (RAN) zwischen den Komponenten der Basisstationen und den Antennenkomponenten. Im Rahmen der Arbeiten entstanden zwei ergänzende Anwendungen, die die neuartige RIS Technologie nutzen. Eine **Security Applikation** soll das illegale Abhören einer Kommunikationsverbindung erschweren, indem unter Nutzung von mehreren RIS im Zeitmultiplex zwischen unterschiedlichen Übertragungspfaden zufällig umgeschaltet wird.

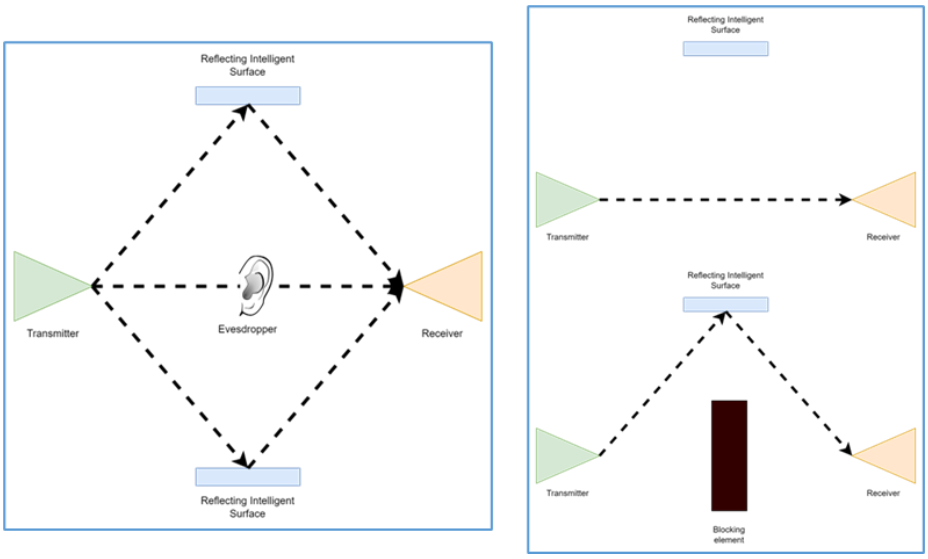


Abbildung 17: Security and Resilience Scenarios

Die **Resilience Applikation** dagegen steigert die Zuverlässigkeit des Übertragungssystems. Dazu erfasst sie durch kontinuierliche Messung der Signalqualität, ob ein Hindernis die „Line of Sight" Verbindung zwischen Sender und Empfänger stört. Im Falle einer Verschlechterung der Übertragungsqualität wird mit Hilfe des RIS ein alternativer Übertragungspfad geschaltet.
Die Resilienz- und Sicherheitsanwendungen basieren auf den von der FAU entwickelten Algorithmen. Beide nutzen Schnittstellen zu einem Messunterstützungssystem und zu der SDN-Funktionalität. Sie erhalten Signalqualitätsinformationen aus der Messung und interagieren mit dem SDN-Bereich bezüglich der Topologie der Knoten im Backhaul. Die SDN-Schnittstelle ist als eine RESTful-Schnittstelle ausgelegt. Dies erleichtert die Integration der Anwendungen in die SDN-Umgebung. Die RESTful-Schnittstelle bietet Funktionen zum Abrufen von Informationen über die Knotenkonfiguration im Backhaul und die aktive Topologie des Backhauls, d.h. welche Routen derzeit zwischen den Knoten aktiv sind. Die RESTful-Schnittstelle besteht aus einer Reihe von HTTP-Diensten, die über eine HTTP-Methode wie GET, POST, PUT, DELETE usw. aufgerufen werden können. Eine OpenAPI-Definition aller verfügbaren Endpunkte unterstützte die Entwicklung der Anwendung, ohne auf eine vollständige Installation des Netzwerks angewiesen zu sein.
Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über die Swagger UI der OpenAPI-Spezifikation.

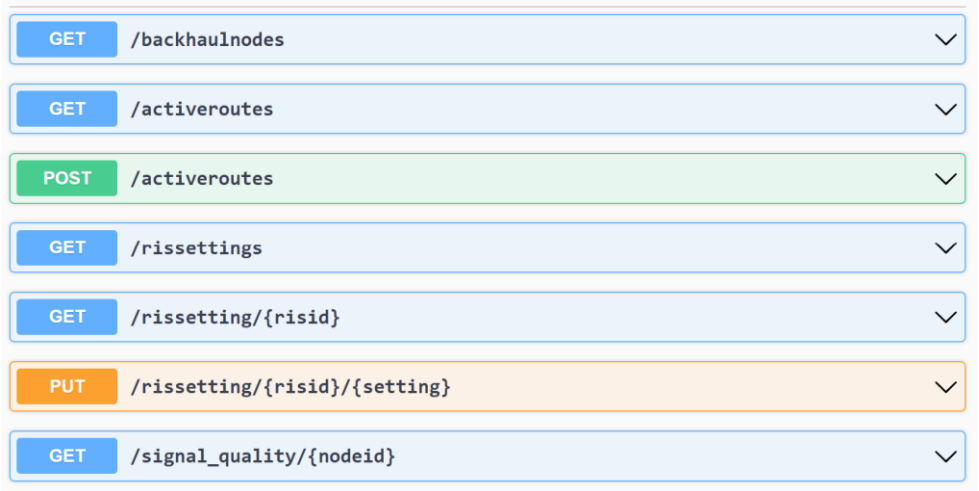


Abbildung 18 Swagger UI der OpenAPI Endpunkte simulieren die SDN-Umgebung mit dem Backhaul für offline Anwednungsentwicklung.

AP5: Virtualisierung von RIS und SDN-basierter Betrieb

In diesem Arbeitspaket sollte die Ansteuerung des RIS und weiterer Netzwerkkomponenten in Form einer SDN-Umgebung betrachtet werden. Dazu ist eine Integration der Komponenten unter Berücksichtigung und Anpassung der Schnittstellen und die Auswahl, Integration und Anpassung eines Open

Source SDN-Controllers notwendig. Dazu werden zuerst geeignete Schnittstellen betrachtet. Bei der Nutzung von Software ist verstärkt auf die Nutzung von Open Source zu achten. Die ausgewählten Softwarekomponenten sind auf die neuartige Komponente RIS anzupassen und ein geeignetes Framework aufzubauen. Den Abschluss bildet eine mit der FAU gemeinsam durchzuführenden technische Umsetzung der beiden ausgewählten Applikationen und die Integration in das genutzte SDN-Framework. Dabei ist unter anderem zu untersuchen, ob Methodiken des maschinellen Lernens sinnvoll genutzt werden können.
Das RIS soll als Ressource im SDN ansteuerbar sein, daher müssen Eigenschaften des RIS im SDN verfügbar gemacht werden. Hierzu dient ein internes Interface zwischen RIS-Hardware und SDN-Controller, welches gemeinsam zwischen den Projektpartnern definiert wurde. Dies ermöglichte eine parallele Entwicklung in SDN und der RIS-Hardware bei gleichzeitig stabilen Schnittstellen. Für die interne Schnittstelle (hierbei wurde auf eine SCPI[1]-artige Syntax zurückgegriffen) mussten zunächst grundlegende Definitionen getroffen werden (Koordinatensysteme, Geometrie, …).
In einem ersten Schritt wurde der SDN-Controller ist für das Management des gesamten Netzwerks betrachtet. Er ist dafür verantwortlich, das Verhalten der einzelnen Netzwerkkomponenten in dem Gesamtsystem zu konfigurieren. Die Netzwerkkomponenten sind in der Regel Netzwerkswitches, die individuelle Übertragungspfade für die unterschiedlichen Ports schalten. Hier wird in dem Projekt in einen Standard-Switch und einem Beam-Switch unterschieden. In der Applikationsschicht sitzen die Anwendungen, die über eine eigene Schnittstelle des SDN-Controllers Kontrolle auf das Verhalten und die Topologie des Netzwerks nehmen können. Nachfolgende Abbildung zeigt die Struktur eines SDN.

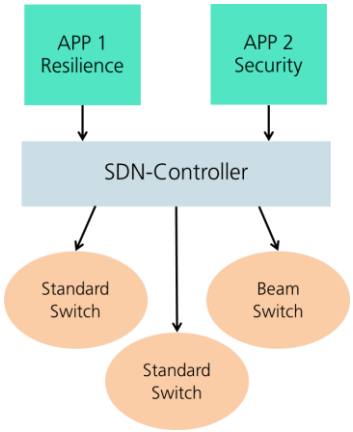


Abbildung 19: Struktur eines Software Defined Netzwerks

Abbildung 20 zeigt einen sogenannten Standard-Switch, der das typische Netzwerkelement in einem SDN darstellt. Der SDN-Controller konfiguriert mit Hilfe des OpenFlow Protokolls eine oder mehrere Routing-Tabellen innerhalb des Switch, die im SDN-Jargon Flow-Tabelle genannt werden. In diesen Tabelle ist festgelegt, wie der Switch auf bestimmten Ports eingehende Nachrichten über andere Ports an die gewünschte Zieladresse weitersendet. Über die Applikationsschnittstelle am SDN-Controller können Applikationen diese Tabellen umprogrammieren und auf diese Weise das Netzwerkverhalten beeinflussen.

[1] Standard Commands for Programmable Instruments

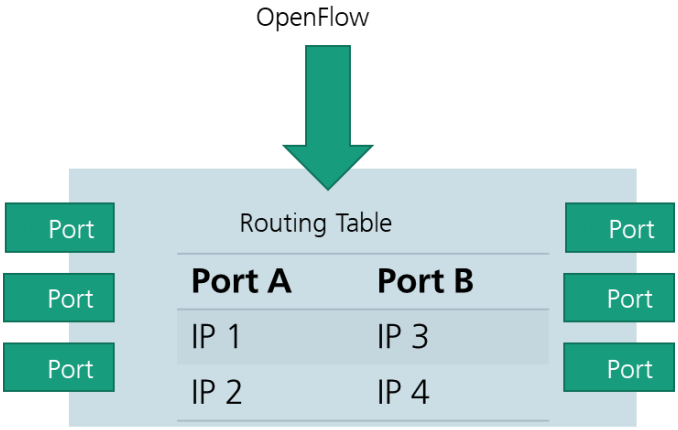


Abbildung 20: Standard-Switch

Ein Standard-Switch ist in Form einer Standardhardware verfügbar, oder wie unter dem Betriebssystem Linux in Form des Open vSwitch in Form einer virtuellen Softwarekomponente. Diese ermöglicht es, dass innerhalb eines Linux-Systems unterschiedliche Kommunikationspfade virtuell geschaltet werden können.
In dem Projekt RIS4NGWB musste im Vergleich zu einem Standard-Switch ein deutlich komplexerer Switch entwickelt werden, der im weiteren als Beam-Switch bezeichnet wird. Er besitzt eine ähnliche Funktionalität, allerdings fungieren bei ihm die einzelnen Elemente der Funkübertragungskette als eine Art physikalischer Ports. Die eigentliche Funkkette besteht aus den verschiedenen Transceivern des 5G Radio Access Netzwerks und den genutzten RIS. Um nicht den kompletten Switch neu programmieren zu müssen, wurde bei der Erstellung des Beam-Switch auf die Softwarekomponente Open vSwitch als Basiselement für das Management der individuellen Flows zwischen diesen Komponenten zurückgegriffen. Die Komponente speichert und managt die sogenannten Flows und wurde im Rahmen des Projekts funktional erweitert.
Die Änderung eines für den Beam-Switch relevanten Flows von Seiten des SDN-Controllers führt zu einer Änderung der relevanten Konfigurationen im Beam-Switch. Diese überträgt er an die Controller der Funkkomponenten. Dazu nutzt jede Komponente einen eigenen Controller, der dafür sorgt, dass die Beams entsprechend der Anforderungen ausgerichtet bzw. die korrekten Reflexionswinkel an den RIS eingestellt werden.

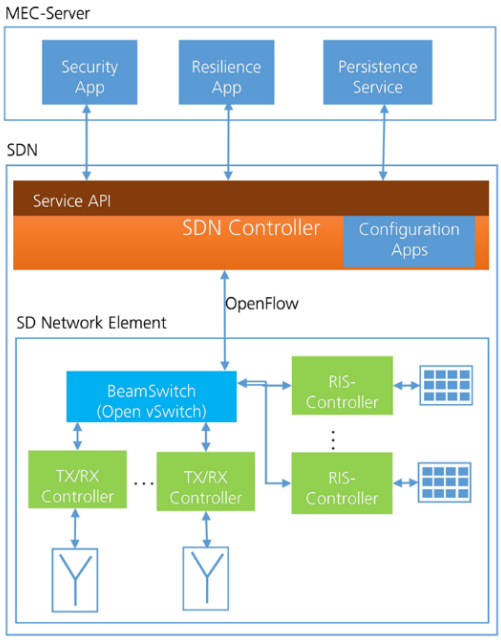


Abbildung 21: Struktur des Beam-Switch
Ein Flow definiert die Verbindung zwischen zwei Komponenten. Dabei stellt eine Route die Verbindung zwischen einem Sender und einem Empfänger dar. Sie besteht aus mindestens einem oder mehreren Flows. Nur ein Flow wird benötigt, wenn eine direkte Verbindung zwischen einem Sender und einem Empfänger besteht. Die Verbindung über einen RIS dagegen benötigt zwei Flows (Route 1). Das Konzept des Beam-Switch erlaubt zusätzlich Verbindungen über mehrere RIS (Route 2).

Aufgrund der Dämpfung der Signalstärke bei der Reflektion an einem RIS dürfte diese Konstellation selten genutzt werden. Der im Rahmen des Projekts entwickelte Beam-Switch ist in der Lage, sowohl Route 1 als auch Route 2 zu realisieren. Im Rahmen des Testbeds wurden nur Routen vom Typ 1 genutzt und getestet.

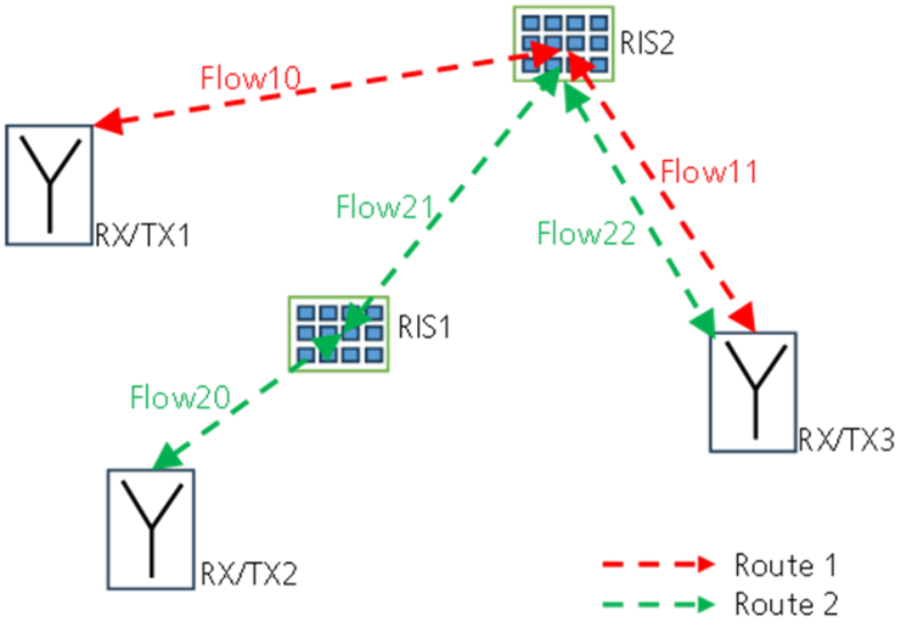


Abbildung 22: Was ist ein Flow

Für eine Berechnung der Konfigurationen in einem Beam-Switch müssen die Koordinaten der genutzten Funkkomponenten bekannt sein. Nachfolgendes Bild zeigt die Positionen eines Senders, eines RIS und eines Empfängers in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem. Weitere Parameter für die Berechnungen sind die Ausrichtungen der einzelnen Elemente im dreidimensionalen Raum. Diese Informationen müssen neben den physikalischen IP-Adressen der Controller der einzelnen Funkkomponenten in geeigneter Form in den Flow-Tabellen des Beam-Switch gespeichert und ausgewertet werden.

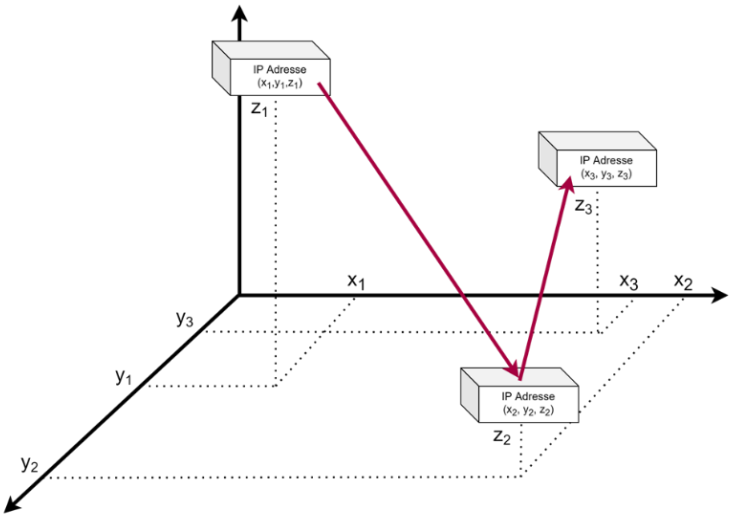


Abbildung 23: Position Information of Network Elements

Im Folgenden wird dargestellt, wie die Informationen zur Berechnung der Konfigurationen in dem Beam-Switch behandelt werden. Ein SDN-Netzwerkelement speichert die relevanten Routing-Informationen in Form von Tabellen. Es wird mindestens eine Tabelle unterstützt, aufgrund der Systemkomplexität in der Regel mehrere Tabellen. In den Tabellen sind die einzelnen Flows gespeichert. Für den Beam-Switch werden ein Cookie, Metadaten, die IP-Adresse des Quellelements und des Zielelements, die ID der Tabelle und des Flows genutzt. Nach Spezifikation kann das Element Cookie

beliebige anwendungsspezifische Daten enthalten. Zur Optimierung der Performance enthält dieses Element im Beam-Switch die ID der Tabelle und des Flows in einer kompakten Darstellung.

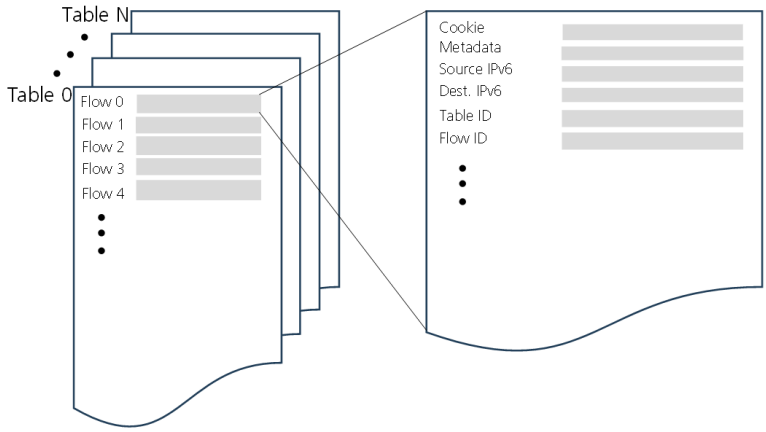


Abbildung 24: Flow Data Structure inside a SDN-Switch

Das Element Metadaten speichert den Typ des Flows. Es werden sieben unterschiedliche Typen unterstützt:

- Eine Line of Sight Verbindung zwischen zwei Transceiver mit deren Koordinaten
- Verbindung von einem Transceiver zu einem RIS mit deren Koordinaten
- Verbindung eines RIS zu einem Transceiver mit deren Koordinaten
- Verbindung zwischen zwei RIS mit deren Koordinaten
- Die Orientierung der betrachteten Funkelemente im dreidimensionalen Raum
- Ein Flow mit den IPv6-Adressen für die Quell- und Zielfunkkomponente
- Der siebte Flow Type wird im Augenblick nicht genutzt

Metadata	Flow type	Description
0x01	Sub-route RXTX-RXTX	Sub-route between two controllable transceivers
0x02	Sub-route RXTX-RIS	Sub-route from a controllable transceiver to a RIS
0x03	Sub-route RIS-RXTX	Sub-route from a RIS to a controllable transceiver
0x04	Sub-route RIS-RIS	Sub-route between two RIS
0x05	Node orientation	Orientation data of nodes as Receiver, RIS, Transceiver, …
0x06	IPv6 Addresses	Physical IPv6 addresses of the source and destination nodes of specific sub-route
0x07	Simple Route RXTX-RIS-RXTX	Description of a simple route between two transceiver connected through a RIS.

Abbildung 25: Unterschiedliche Typen von Metadaten

Bei der Kodierung der Element-Koordinaten eines Flows wird unterschieden, ob der Beam-Switch IPv6 oder IPv4 Adressen nutzt. Der Vorteil bei der Nutzung von IPv4-Adressen liegt darin, dass eine Kodierung der Positionskoordinaten und der jeweiligen IP-Adressen in einem einzigen Flow erfolgen kann. Bei Nutzung von IPv6-Adressen reicht der in einem Flow zur Verfügung stehende Informationsplatz nicht aus. In diesem Fall kommen zwei Flows zum Einsatz.
Die nachfolgenden Bilder zeigen den Aufbau der unterschiedlichen Flows. Relevant für die Adressierung ist das 32-Bit große Feld »Physikalischer Address Code«. Bei Nutzung von IPv4 passt in dieses Feld die vollständige Adresse des jeweiligen Elements. In diesem Fall werden die vorgesehenen Felder für die Quell- und die Zieladresse genutzt. Bei der Nutzung der deutlich größeren IPv6-Adressen ist in dem ersten Feld des Address Codes ein Zeiger auf einen weiteren Flow gespeichert. Dieser

Zeiger besteht aus der Tabellen ID und Flow ID des Adresseintrags. Um in der Implementierung des erweiterten Open vSwitch diesen Flow schneller zu finden, sind in dem adressierten Flow die eigene Tabellen- und Flow-ID zusätzlich in seinem Cookie gespeichert. Nachfolgende Bilder zeigen die Einträge und die entsprechend zugehörigen Codierungen der Metadaten.

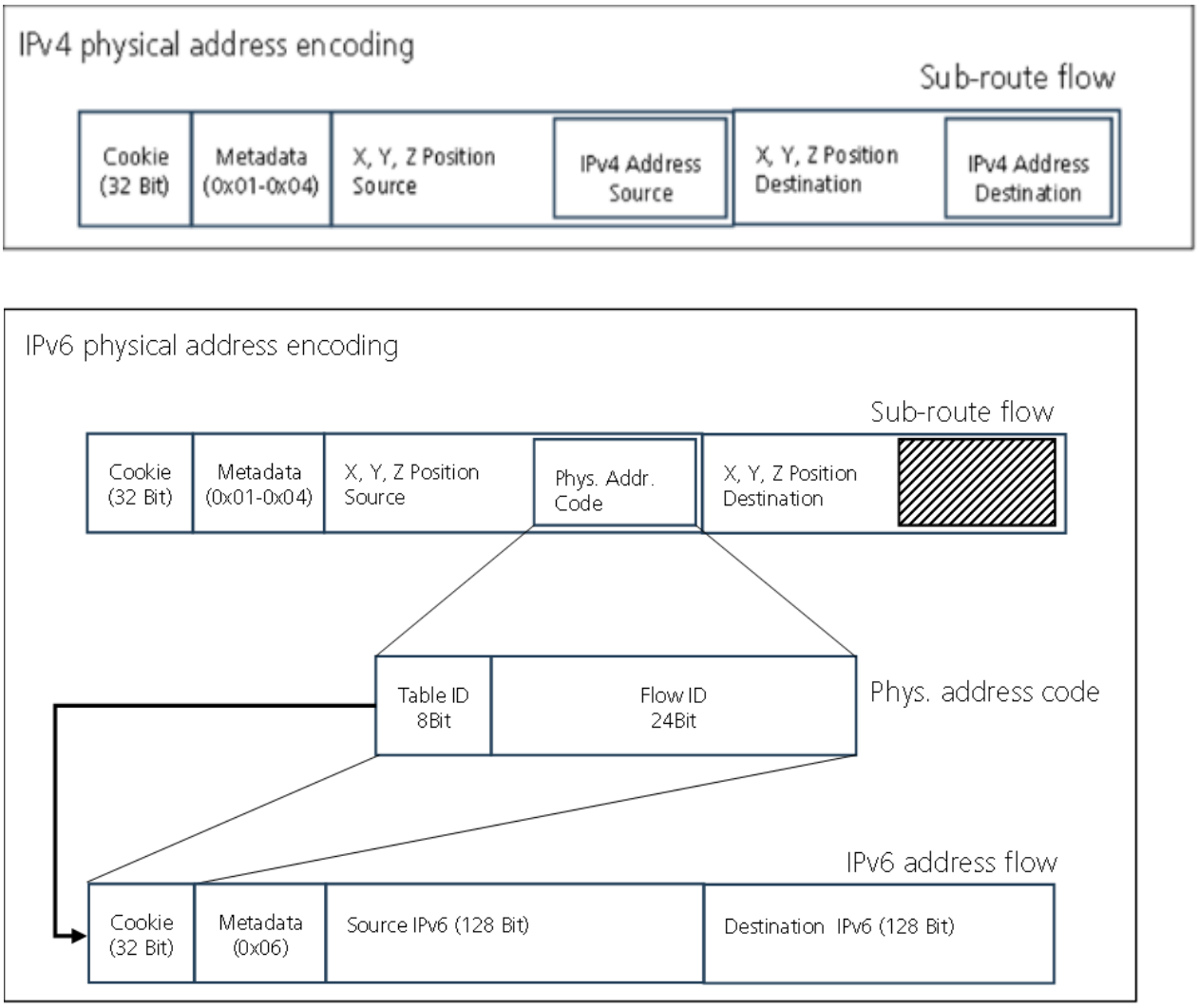


Abbildung 26: Kodierung einer Adress- und Positionsinformation

Die Codierung der Orientierung im dreidimensionalen Raum der zwei an einem Flow beteiligten Funkelemente wird in vergleichbarer Form durchgeführt. In diesem Fall enthalten die Flows keine Positionsdaten, sondern die drei Orientierungswinkel in der sogenannten Euler-Darstellung[2] jeweils mit 32-Bit kodiert. Nachfolgende Bilder zeigen die Einträge und die entsprechend zugehörigen Codierungen der Metadaten.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles

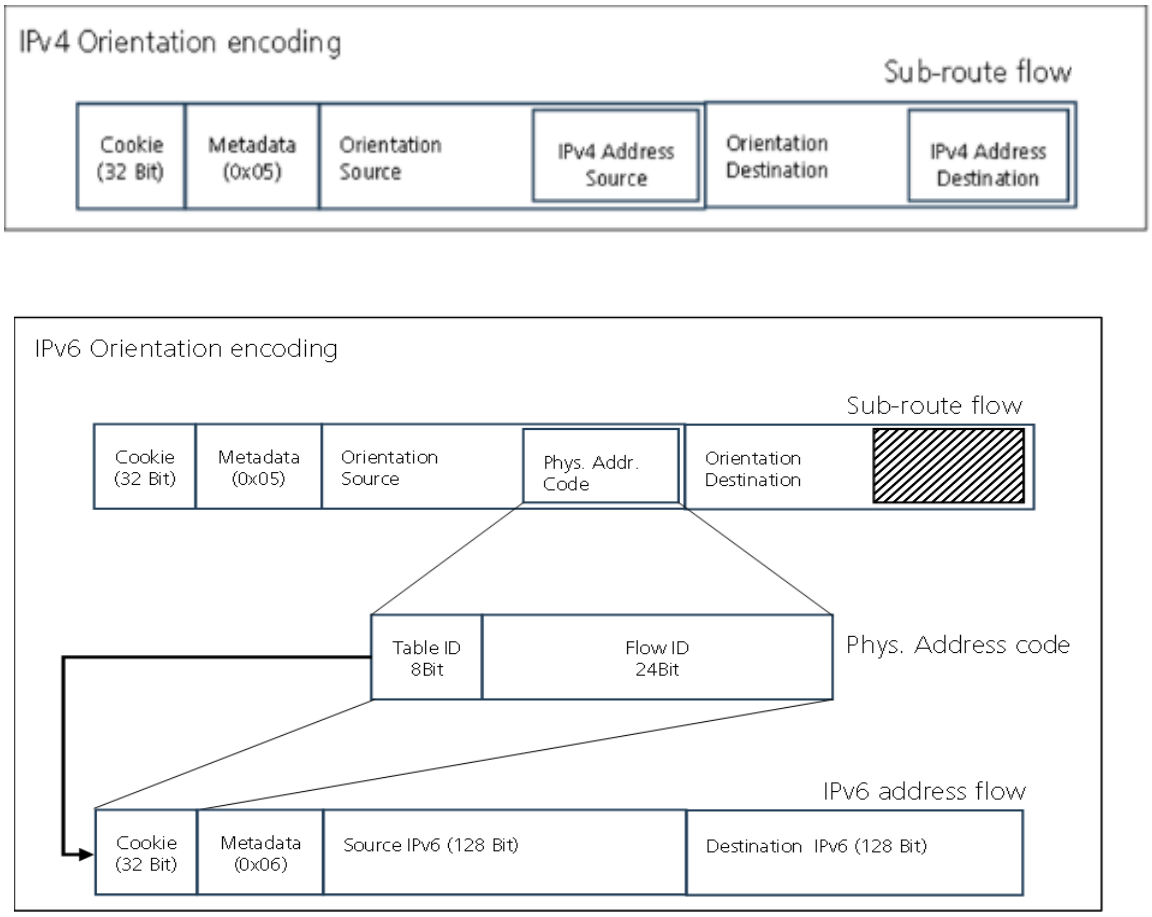


Abbildung 27: Kodierung deiner Adress- und Orientierungsinformation

Mit Untersuchungen und Erfahrungen bei der Integration in das Testbed zeigte sich, dass maschinelles Lernen (ML) ein leistungsstarkes Werkzeug zur Verbesserung der Leistung und Anpassungsfähigkeit von rekonfigurierbaren intelligenten Oberflächen (RIS) in drahtlosen Kommunikationssystemen sein kann. Die traditionelle Steuerung von RIS ist rechenintensiv und in Echtzeit oder komplexen Szenarien unpraktisch. ML-Algorithmen können verwendet werden, um die Beziehung zwischen Umgebungsmerkmalen und optimalen RIS-Konfigurationen zu erlernen, was eine schnelle und effiziente Entscheidungsfindung ermöglicht. Dies ist besonders wertvoll in dynamischen oder hardwareimperfekten Umgebungen, in denen traditionelle Methoden Schwierigkeiten haben.
Dies spricht dafür, im Rahmen von weiteren Projekten, den Einsatz von ML beim Design von RIS-Komponenten und der optimalen Ansteuerung weiter zu analysieren. So könnten weitere Forschungsarbeiten verschiedene ML-Modelle, wie beispielsweise Reinforcement Learning (RL), untersuchen, um robuste und skalierbare Steuerungsrahmen für RIS zu entwickeln. Diese Modelle können mit simulierten oder gemessenen Daten trainiert werden, um optimale Phasenschieber oder Beamforming-Strategien vorherzusagen, wobei sowohl die Systemleistung als auch die Hardwarebeschränkungen berücksichtigt werden. Die Integration von ML in das Design und den Betrieb von RIS besitzt das Potenzial, um drahtlose Systeme intelligenter und effizienter zu realisieren.

AP6: Evaluierung des Gesamtkonzepts und Verwertung

In diesem Arbeitspaket soll ein Evaluierungssetup entwickelt werden, das die Messung und Bewertung des ausgewählten Szenarios ermöglicht. Die Umsetzung findet im Testcenter LINK des Fraunhofer IIS statt. Dabei konzentriert sich der erste Arbeitsschritt auf Entwurf und Realisierung des Hardware-Setups (Antennen, Signalerzeugung, Empfänger, usw.) für die Evaluierung. Darin wird das realisierte RIS (AP3) eingebettet. Für den Betrieb erfolgt eine Programmierung und Anpassung der Firmware. Im darauffolgenden Arbeitsschritt werden eine Messkampagne und ein Testplan entworfen. Es folgt eine Analyse der Messungen im Hinblick auf die dynamische Reaktion des Backhaulsystems und die Validierung der Ergebnisse aus den vorrausgegangenen Arbeitspaketen. In einem weiteren Arbeitsschritt wird das SDN-Environment in das Testbed integriert. Es folgen die Anbindung der im Rahmen vom ersten Arbeitsschritt entstehenden Hardware-Setups, eine Erstellung der SDN betreffenden

Testpläne, die Durchführung der spezifizierten Tests einschließlich der Auswertung und Dokumentation. Optimierungsarbeiten an den erstellten SDN-Applikationen und des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten auf Basis der Ergebnisse des Betriebs im Testbed schließen diesen Schritt ab. Der letzte Arbeitsschritt konzentriert sich auf die Verwertung der Projektergebnisse. Dazu soll eine Beteiligung an Industrie- und wissenschaftlichen Konferenzen erfolgen. Weiterhin ist geplant, die Verwertung der Projektergebnisse durch Vorbereitung späterer Standardisierungsbeiträge voranzutreiben. Weiterhin werden die Ergebnisse in relevanten Verbänden (z.B. 5G-ACIA oder 6G-Plattform) vorgestellt.
Getestet wurde der neuartige RIS in der LINK-Halle des Fraunhofer IIS. Dabei kam als Signalquelle ein Signalgenerator zum Einsatz. Eine Antenne sendete das erzeugte Signal zum RIS, der den einfallenden Beam über den eingestellten Winkel in Richtung einer Empfangsantenne reflektierte. Mit einem Spektrumanalyzer konnte dann die Qualität des empfangenen Signals beurteilt werden.
Die entwickelte Hardware wurde im kompletten FR2-Band getestet und zeigt breitbandig eine gute Performance (Abbildung 28) und Stabilität. Bei den weiteren Messungen wurde das RIS bei der Nominalfrequenz von 28 GHz betrieben.

Scenario:

RIS incident angle: 0 degree
RIS reflection angle: 25 degrees
Distance Tx-RIS: 80 cm
Distance RIS-Rx: 5.5 m

FR2 band

Frequency	Max received power	Min received power
16 GHz	-37.79 dBm	-37.99 dBm
24 GHz	-31.72 dBm	-33.39 dBm
26 GHz	-36.60 dBm	-45.17 dBm
28 GHz	-44.78 dBm	-48.065 dBm
30 GHz	-50.89 dBm	-56.6 dBm
35 GHz	-59.45 dBm	-59.6 dBm

Abbildung 28: Funktionalität im FR2-Band

Im Indoor-Bereich zeigte sich eine sehr große Empfindlichkeit des Aufbaus auf Reflexionen von Wänden oder Gegenständen in der Nähe. Aus diesem Grund musste ein sehr großer Aufwand in die Abschirmung von Reflexionen gesteckt werden. Ein zwei-dimensionales RIS ist in der Lage, Reflexionen in Azimut und Elevation (also 3D) zu steuern. Die Testhalle bot die Möglichkeit, Messungen in allen drei Richtungen auszuführen. So wurden unter anderem durch die Installation von Messequipment auf der Galerie der Halle Testreihen für ein Drohnenszenario simuliert (Abbildung 29).

Max received power phase distribution (scan row): 0110100001

Final xor table:

```
[[0 1 1 0 1 0 0 0 0 1]
 [0 1 1 0 1 0 0 0 0 1]
 [0 1 1 0 1 0 0 0 0 1]
 [0 1 1 0 1 0 0 0 0 1]
 [1 0 0 1 0 1 1 1 1 0]]
```

Phase distribution for example 3D scenario

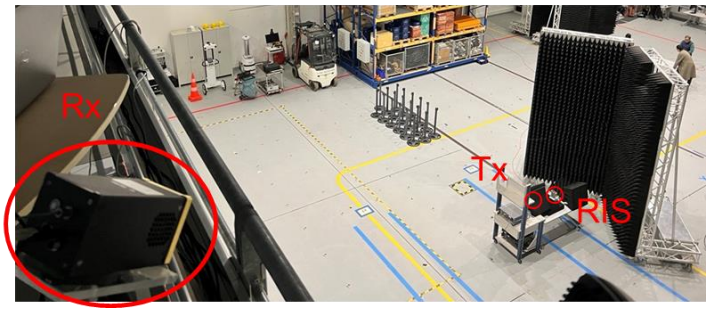


Abbildung 29: 3D-Szenario

Dabei zeigte sich, dass im Innenbereich die Empfindlichkeit des Testaufbaus auf geringste Abweichungen in der Ausrichtung der Komponenten zueinander zu einem Abbruch der Verbindung führte. Dieser Umstand erschwert das Abhören dieser Verbindung, erschwert aber auch den Aufbau einer stabilen Verbindung während des Flugs einer Drohne. Hier kann der Einsatz von Machine Learning eine deutliche Verbesserung der Verbindungsqualität bringen, entsprechende Maßnahmen konnten leider nicht mehr technisch umgesetzt werden.

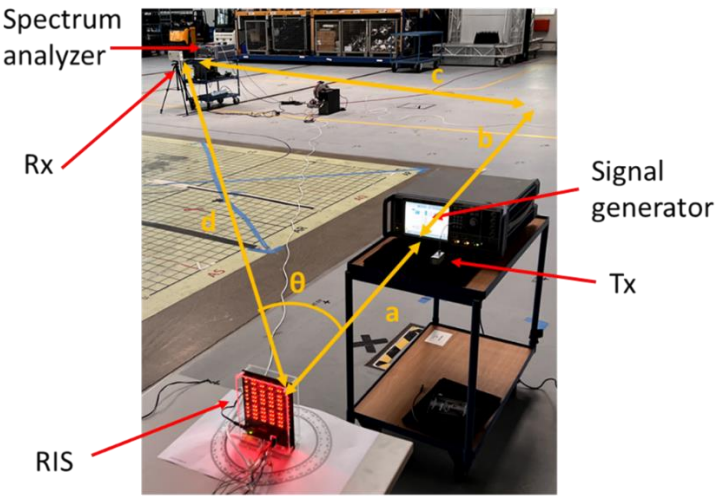


Abbildung 30: Messaufbau für die Experimente, die im LINK-Testcenter am Fraunhofer IIS stattgefunden haben

Die Funktionsweise des BeamSwitch, der beiden Resilienz und Security Apps, und des neu entwickelten RIS wurde in einem eigenen Testbed getestet. Um realistische Daten übertragen zu können, kam die FR2-Plattform des Fraunhofer IIS zum Einsatz. Diese Plattform realisiert die wichtigen Teile des 5G Physical Layers eines 5G Radio Access Network. In dem Testbed wurde sie zur Übertragung von Videodaten genutzt und simulierte damit die Nutzung als drahtloses Übertragungsmedium für ein 5G Backhaul.
Nachfolgende Abbildung zeigt die wichtigsten Komponenten des Testaufbaus. Um ein korrektes Netzwerkmanagement durchführen zu können, benötigt die SDN-Umgebung Informationen zur aktuellen Konfiguration des Backhauls. Diese besteht aus Informationen zu den Komponenten wie Transceiver oder RIS, insbesondere deren Ausrichtung und Position innerhalb des geometrischen Aufbaus des Backhauls. Über eine Schnittstelle an der FR2-Plattform holt sich die Software Defined Networking Umgebung Informationen über die Signalqualität der jeweils aktuell eingestellten Verbindungen ab. Diese werden von der FR2-Plattform während der Übertragung der Daten ermittelt und zur Verfügung gestellt.

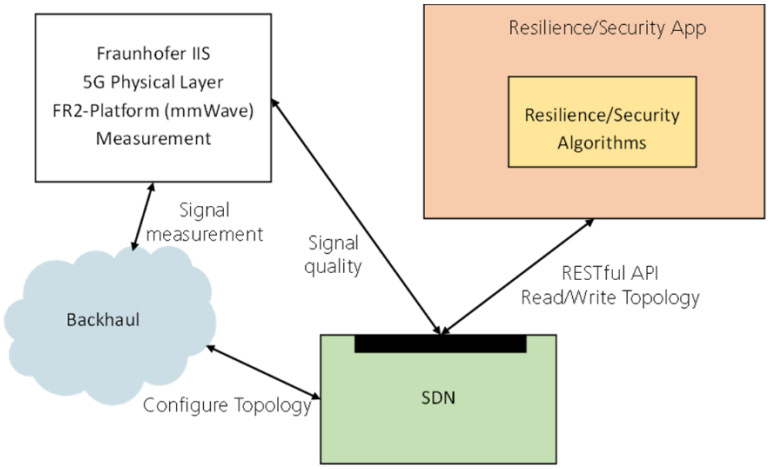


Abbildung 31: Struktur des SDN-Testbed

Die beiden im Rahmen des Projekts entwickelten Applikationen frage alle zur Verfügung stehenden und relevanten Daten über ein RESTful API ab. Auf Basis dieser Daten entscheiden die Applikationen im Anschluss, wie die aktuellen Routen zu schalten sind. Über das API zum SDN werden die aufgrund der Algorithmen gefundenen notwendigen Änderungen am Netzwerk durchgeführt.

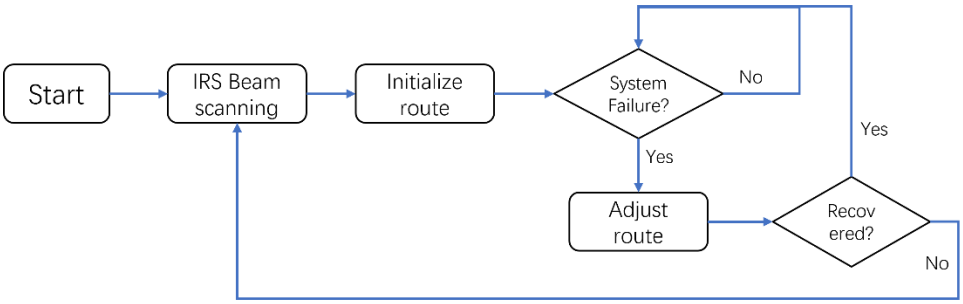


Abbildung 32: Blockdiagramm des vereinfachten Resilienzprotokolls

Die Hauptaufgabe der Resilience App (siehe Abbildung 32) besteht darin, aufgrund der Signalqualität die besten Routen im Netzwerk zu finden und einzustellen. Um die CSI-Anforderungen beim Design der RIS-Phase-Shifts für die Systeminitialisierung zu verringern, schlagen wir eine neuartige CSI-freie RIS-Konfigurationsstrategie vor, die auf dem Feedback der empfangenen Leistung basiert. Insbesondere wird nach der Initialisierung der RIS-Phase-Shifts in jeder Iteration ein Satz von RIS-Konfigurationskandidaten generiert, und die entsprechende Empfangsleistung wird gemessen und an die Steuereinheit gemeldet. Unter Verwendung der Rückmeldungen zu diesen Messungen werden die RIS-Phase-Shifts gemäß einer Greedy-Strategie angepasst. Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, wird mit dem vorgeschlagenen Entwurf die gleiche RIS-Konfiguration wie bei einer vollständigen Suche erzielt, allerdings mit einer deutlich geringeren Zahl von Leistungsmessungen und Rückkopplungen. Das entwickelte CSI-freie RIS-Design mit geringer Komplexität wurde auf einer Konferenz vorgestellt und umfassend analysiert.
Nach der Festlegung der RIS-Konfiguration haben wir das Design des BS-Beamforming zu einem Routing-Problem vereinfacht. Insbesondere führt die BS in der Initialisierungsphase eine Beam-Scanning durch, um auf RIS und Benutzer ausgerichtete Beamformingsvektoren zu ermitteln. Dann, in der Initialisierungsphase, bestimmt das System die zu wählende Route, d.h. eine RIS-Route oder eine direkte BS-Benutzer-Route, basierend auf der Leistungsrückmeldung. Anschließend wird der BS-Beamforming-Vektor als der Beamformingvektor festgelegt, dem die ausgewählten Route entspricht.

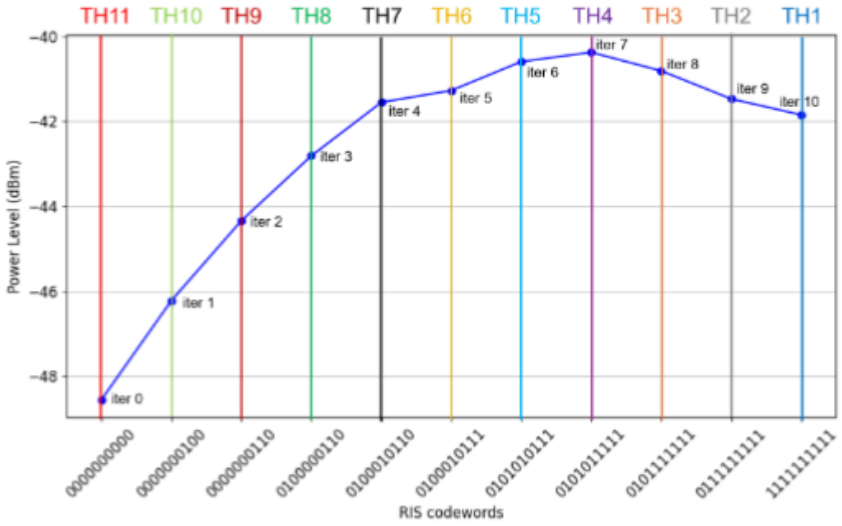


Abbildung 33: Empfangene Leistung zu verschiedenen Codewörtern. Das optimale Codewort wird in der 7. Iteration des vorgeschlagenen CSI-freien Verfahrens ermittelt.

Die Security App beeinflusst die vorhandenen Routen in einer Form, dass einem möglichen Abhörer der Zugriff auf das Netzwerk deutlich erschwert wird. Dabei zeigte sich in den Tests, dass die Applikationen die jeweilige Aufgabenstellung korrekt bearbeiteten (siehe Signalverläufe in Abbildung 34).

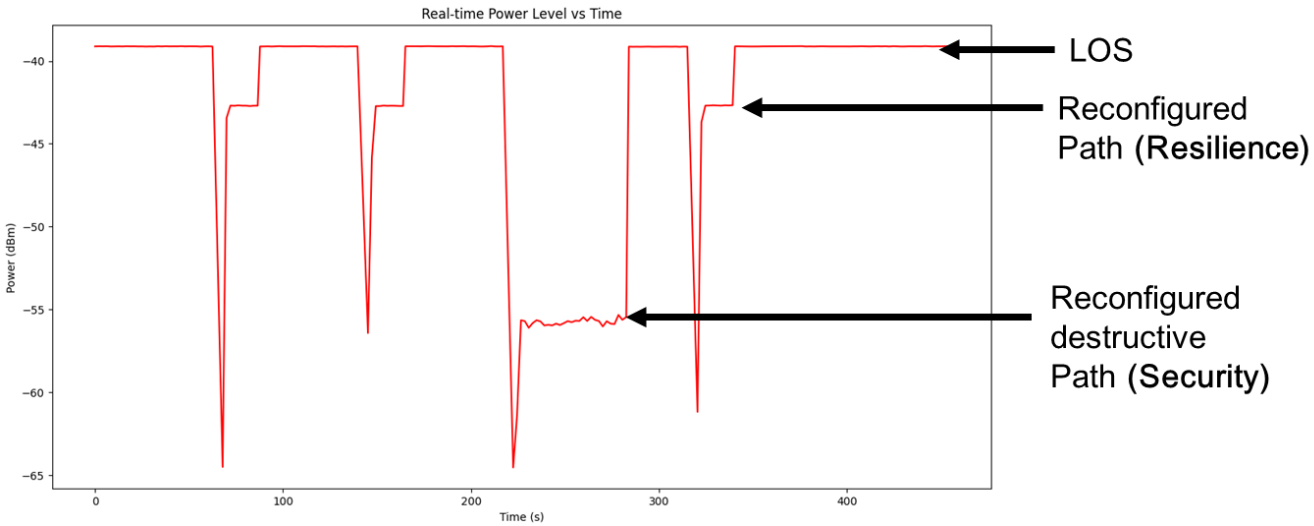


Abbildung 34: Empfangssignal beim Resilienz- und Sicherheitsszenario

Die Ergebnisse des Projekts wurden auf verschiedenen Kongressen und Veranstaltungen einer breiten wissenschaftlichen und allgemeinen Öffentlichkeit vorgestellt. Auf Basis der Ergebnisse ergaben sich neue wissenschaftliche Fragestellungen und ein Optimierungspotenzial, dass in nachfolgenden Forschungsprojekten behandelt werden soll.

2. die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Personalkosten: es wurden wiss. Mitarbeitende sowie studentische Hilfskräfte beschäftigt, um die wissenschaftlich-technischen Arbeiten durchzuführen
- Investitionskosten: einige für die experimentellen Untersuchungen notwendige technische Geräte waren nicht verfügbar und mussten beschafft werden, ebenso Lizenzen für Simulationssoftware
- Verbrauchsmaterial: für die Herstellung der RIS, die experimentellen Aufbauten sowie bei der Entwicklung und Durchführung notwendiger Hilfsaufbauten waren elektronische Komponenten, Adapter, Kabel und anderes Verbrauchsmaterial notwendig
- Reisekosten: Für die experimentellen Untersuchungen im Testcenter LINK, Projekttreffen und Reisen zu Konferenzen und anderen Öffentlichkeits-Aktivitäten wurden Reisekosten benötigt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Trotz der vergleichsweise kurzen Bearbeitungszeit sind eine Vielzahl an Publikationen, eine Patentanmeldung sowie mehrere Demonstratoren entstanden. Das Vorhaben hatte und hat großen Einfluss auf die weitere Entwicklung in Richtung 6G, insbesondere auch vor dem Hintergrund von Sicherheit und Resilienz.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Gemeinsam mit Fraunhofer IIS wurde am 6. Juni 2024 eine Patentanmeldung eingereicht: Reflector and a method for reflecting electromagnetic waves. Diese Anmeldung befindet sich aktuell in der Prüfphase und bietet eine gute Grundlage für zukünftige Verwertungen, entweder direkt oder mittels Industriekooperationen: Weiterhin sind sichere Kommunikationsinfrastrukturen von wachsender Bedeutung. Auch die Anwendung von RIS im Rahmen von 5G / 6G-Infrastruktur hat weiterhin großes

Innovationspotenzial. Für das 3GPP RAN Plenary Meeting #108 im Juni 2025 soll ein gemeinsamer Vorschlag unterschiedlicher Organisationen eingebracht werden, dass RIS als eine der Schlüsseltechnologien für 6G benannt wird. Dies zeigt einerseits den Stellenwert der hier durchgeführten Forschung und erhöht andererseits die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten u.a. bei der Verwertung des Patentes. Mit dem (durch die große Zahl der Veröffentlichungen nachgewiesenen) Know-How-Aufbau und die weitere Erhöhung der Reputation aller beteiligter Partner eröffnen sich nun weitere Möglichkeiten für weitere Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten auch im Umfeld von Industrie- und Verfahrenstechnik und anderen Feldern, wo sichere Funktechnologien an Wichtigkeit gewinnen. Es kann sich hierbei sowohl um Forschungsvorhaben als auch um Transfer und Beratung regionaler Unternehmen handeln. Alle Partner arbeiten an Anträgen für Folgevorhaben. Es konnten bereits Studierende in das Vorhaben eingebunden werden, was zu ihrer praxisnahen Ausbildung beiträgt.

5. Fortschritt bei anderen Stellen

Es wurde permanent der Stand der Wissenschaft und Technik verfolgt. Obwohl einige RIS-Demonstratoren im gleichen Frequenzbereich entwickelt wurden, wurde keines der in AP1 / AP2 untersuchten Szenarien veröffentlicht oder untersucht.
RIS Demonstratoren aus der Literatur:

- S. Shekhawat, B. G. Kashyap, B. Tjahjadi, and G. C. Trichopoulos, “Beamforming characterization of a mmwave single-bit reflective metasurface,” in 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), IEEE, 2022, pp. 1608–1609.
- R. Wang, Y. Yang, B. Makki, and A. Shamim, “A wideband reconfigurable intelligent surface for 5g millimeter-wave applications,” arXiv preprint arXiv:2304.11572, 2023.
- J. Jeong, J. H. Oh, S. Y. Lee, Y. Park, and S.-H. Wi, “An improved path-loss model for reconfigurable-intelligent surface-aided wireless communications and experimental validation,” IEEE Access, vol. 10, pp. 98 065–98 078, 2022.
- TMYTEK hat ein RIS im selben Frequenzbereich angekündigt, aber aus den öffentlich zugänglichen Dokumenten ist die Leistungsfähigkeit nicht klar ersichtlich: https://tmytek.com/products/components/xrifle-dynamic-ris)

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- Conference paper, 11.-13.03.2024: M. Arslan et al.: 2x2 Tile Usable for Reconfigurable Intelligent Surfaces Operating at 28 GHz. GeMiC 2024 (doi: 10.23919/GeMiC59120.2024.10485327). (10.2023)
- Wiss. Journal-Artikel in IEEE TAP: M. Arslan et al.: Design Considerations and Propagation Properties Using an SDN-Controlled RIS for Wireless Backhauling. IEEE TAP (doi: 10.1109/TAP.2025.3531639) (12.2024)
- Conference paper, 8-14.06.2025: Wu et al.: Introducing Resilience to IRS-Assisted Secure Wireless Systems, ICC Workshop 2025 (doi: 10.48550/arXiv.2501.12551) (06.2025).
- Conference paper (eingereicht): Wu et al.: Low-Complexity CSI-Free Reconfigurable Intelligent Surface Phase Shift De-sign, WSA 2025 (06.2025)
- Scientific letter in IEEE LMWT: M. Arslan et al.: General Method for Characterizing Switchable Elements for RIS Using De-embedding Structures (doi: 10.1109/LMWT.2025.3574501) (06.2025)
- Wiss. Journal-Artikel in IEEE TAP: (eingereicht): H. Rezaei et al.: Hardware Limitations and Optimization Approach in 1-Bit RIS Design at 28 GHz (doi: 10.48550/arXiv.2506.08930) (05.2025)

- Wiss. Journal-Artikel in IEEE TWCWu, Yifei, et al. "Globally optimal resource allocation design for discrete phase shift IRS-assisted multiuser networks with perfect and imperfect CSI." IEEE Transactions on Wireless Communications (2024).
- Wu, Yifei, et al. "Globally optimal movable antenna-enhanced multi-user communication: Discrete antenna positioning, motion power consumption, and imperfect CSI." arXiv preprint arXiv:2408.15435 (2024).
- Conference paper: Wu, Yifei, et al. "Globally optimal resource allocation design for IRS-assisted multiuser networks with discrete phase shifts." 2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2023.
- RIS4NGWB Demo, Workshop on Smart Antennas 2024, Hossein Rezaei, Bhavanithya Thiraviaraja, George Yammine; 17.-19.03.2024 in Dresden
- Vortrag zu “Hardware Limitations and Optimization Approach in 1-Bit RIS Design at 28GHz”, Hossein Rezaei, Berlin 6G Conference 2025, 01.-03.07.2025 in Berlin
- RIS4NGWB Demo, 5G Connect Advanced 2024, Hossein Rezaei, Bhavanithya Thiraviaraja, George Yammine, Zekeriya Mansuroglu, Peter Heusinger; 19.09.2024 in Nürnberg

Geplante Veröffentlichungen

- H.Rezaei et al: Sparse RIS tile modifications