

Rekonfigurierbare Metaoberflächen-Technologie
für 6G-Mobilfunk

REMoTE

Sachbericht zum Verwendungsnachweis,
Teil I – Kurzbericht

Förderzeitraum: 01.07.2022 – 31.12.2025

Dr. Enrico Tolin, Jochen Mosig, Dr. Achim Bahr,
IMST GmbH, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2-4, D-47475 Kamp-Lintfort

Name des
korrespondierenden Autors: Achim Bahr

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 16KIS1632K gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert vom:

Projektträger

Aufgabenstellung und Stand der Technik

In bisher fünf Generationen des zellularen Mobilfunks wurden stets Sender und Empfänger so angepasst, dass bei einem gegebenen Funkwellenausbreitungskanal die bestmögliche Übertragung erzielt wird. Die aktuelle 5. Generation setzt hierzu z.B. auf Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). Hierbei wird der vorhandene Übertragungskanal durch eine optimale Verteilung des Signals auf sehr viele Antennen der Basisstation und einer entsprechenden Auswertung an einer oder mehreren Antennen an der Mobilstation bestmöglich ausgenutzt.

In jedem Fall ist die Optimierung allerdings durch den vorgegebenen Funkwellenausbreitungskanal begrenzt. So können z.B. durch Objekte abgeschattete Bereiche nur durch die Beleuchtung eventuell vorhandener Mehrwegekanäle erreicht werden.

Intelligente Metaoberflächen sind ein vielversprechender Ansatz, um insbesondere die Ausleuchtung in abgeschatteten Bereichen entscheidend zu verbessern: Basierend auf dem Funktionsprinzip eines Spiegels wird die Rekonfigurierbarkeit der Oberfläche genutzt, um eine einfallende elektromagnetische Welle in eine vorgegebene Richtung zu reflektieren. Mit einer solchen Lösung wäre es möglich, diese intelligenten Oberflächen optisch ansprechend in vorhandene Bebauung zu integrieren und trotzdem nahezu beliebige Kombinationen von Einfallswinkel/Ausfallswinkel zu erzielen.

In der Fachliteratur gibt es seit einigen Jahren Publikationen zum Design von Metaoberflächen. Untersuchte Frequenzen, der Rekonfigurationsansatz und die Demonstratorrealisierung nehmen jedoch kaum Rücksicht auf eine Umsetzbarkeit in realen Mobilfunkszenarien. Insofern ist auf dem Markt momentan auch kein Produkt verfügbar, das für die erforderlichen Frequenzbänder mit einem angemessenen Scanbereich einsetzbar ist.

Ziel dieses Projekts war daher, eine rekonfigurierbare 6G-Metaoberflächen-Architektur zu entwickeln und zu erproben, die eine möglichst hohe Flexibilität, Performance und Effizienz aufweist und gleichzeitig eine spätere industrielle Fertigung zu akzeptablen Kosten ermöglicht.

Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt ReMoTe hatte eine Laufzeit von 36 Monaten und wurde kostenneutral um weitere 6 Monate verlängert. Im Folgenden wird der Arbeitsablauf anhand der relevanten Arbeitspakete dargestellt.

Management: Kommunikation. Koordination der Arbeiten.

Spezifikation der rekonfigurierbaren Metaoberfläche: Stand der Standardisierung und Aussichten. Anwendungsfälle für rekonfigurierbare Metaoberflächen in 6G. Spezifikationen für rekonfigurierbare Metaoberflächen in 6G.

Passives elektromagnetisches Design der Einheitszelle: Analyse der Konzepte für Einheitszellen. Implementierung von Modellierungswerkzeugen. Entwurf und Analyse der Einheitszelle für die weiteren Arbeiten.

Rekonfigurierbarkeitskonzept der Einheitszelle: Auswahl der Komponenten/Technologien zur Realisierung der Rekonfigurierbarkeit. Schaltungstechnische Modellierung. Laboraufbau.

Design der Metaoberfläche: Passive Struktur der Metaoberfläche. Schaltungstechnische Funktionalisierung zur Rekonfigurierbarkeit (Konzept/Simulation).

Demonstratoraufbau: Passive Struktur des Demonstrators (Entwicklung/Fertigung). Schaltungstechnische Funktionalisierung zur Rekonfigurierbarkeit (Entwicklung/Fertigung). Software.

Kammermessungen: Ausarbeitung des Messkonzepts. Einrüsten der Messung. Durchführung der Messung.

Feldtest: Vorbereitung des Testbeds. Integration des Demonstrators in das Testbed. Charakterisierung des Demonstrators.

Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine rekonfigurierbare Metaoberfläche (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) für Anwendungen im Frequenzbereich von 7,125 bis 8,5 GHz spezifiziert und experimentell untersucht, für den Demonstrator war insbesondere der Bereich 7,5 bis 7,9 GHz von Bedeutung. Die RIS wurde für Nutzkanäle mit 200 MHz Bandbreite ausgelegt; zugleich zeigte die Analyse, dass bereits eine Phasenauflösung von 2 Bit mit 90°-Phaseninkrementen eine ausreichende Systemperformance ermöglicht. Als relevanter Scanbereich wurden $\pm 20^\circ$ in der Elevation sowie $\pm 60^\circ$ im Azimut definiert. Im Hinblick auf einen modularen und wirtschaftlichen Aufbau wurde eine mikrocontrollerbasierte Architektur gewählt, da diese gegenüber FPGA-Lösungen geringere Kosten und einen reduzierten Implementierungsaufwand aufweist.

Für das elektromagnetische Design der Einheitszellen wurde das IMST Simulationstool EMPIRE XPU verwendet. Ziel war die Bestimmung des Reflexionsverhaltens hinsichtlich Betrag und Phase des Reflexionsfaktors unter periodischen Randbedingungen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde zudem ein geeignetes Tuningelement ausgewählt. Der Vergleich von Flüssigkristallen, GST/GeTe, PIN-Dioden und Varaktoren ergab, dass Varaktoren für den vorgesehenen Frequenzbereich die günstigste Kombination aus kontinuierlicher Abstimbarkeit, geringer Ansteuerleistung, Integrationsfähigkeit, kurzen Schaltzeiten und Kosten bieten. Für die Erzeugung der Varaktorspannung wurde ein DAC-basierter sowie ein PWM-basierter Ansatz untersucht, wobei sich die PWM-Lösung aufgrund besserer Skalierbarkeit, geringerer Kosten und höherer Robustheit als überlegen herausstellte.

Die entwickelte RIS-Einheitszelle basiert auf einem magneto-elektrischen Dipol mit Ringpatch und verwendet einen Skyworks SMV1405-040LF Varaktor. Messungen und Simulationen zeigen bei 7,7 GHz einen Phasenhub von über 270°, passend für die Realisierung einer 2-Bit-RIS. Darauf aufbauend wurden sowohl statische Panels als auch ein modulares RIS-Panel mit 30 x 30 Einheitszellen realisiert. Kammermessungen belegen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment sowie eine erfolgreiche Strahlschwenkung für verschiedene Scanwinkel. Im abschließenden Feldtest in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern LUH und Ericsson konnte durch den Einsatz der RIS eine Verbesserung des Empfangspegels um 12 dB gegenüber der Referenzsituation unter Non-Line-of-Sight-Bedingungen nachgewiesen werden. Insgesamt belegen die Ergebnisse die technische Eignung der entwickelten RIS zur gezielten Reflexionssteuerung und zur Verbesserung drahtloser Übertragungskanäle.

Rekonfigurierbare Metaoberflächen-Technologie
für 6G-Mobilfunk

REMoTE

Sachbericht zum Verwendungsnachweis,
Teil II

Förderzeitraum: 01.07.2022 – 31.12.2025

Dr. Enrico Tolin, Jochen Mosig, Dr. Achim Bahr,
IMST GmbH, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2-4, D-47475 Kamp-Lintfort

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 16KIS1632K gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert vom:



Projektträger



Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	3
2	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
3	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
3.1	Wissenschaftliches Umfeld und Situationsanalyse	4
3.2	Wettbewerbssituation und Patentlage	4
4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
5	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse	5
5.1	Management.....	5
5.2	Spezifikation der rekonfigurierbaren Metaoberfläche.....	5
5.3	Passives elektromagnetisches Design der Einheitszelle	6
5.4	Rekonfigurierbarkeitskonzept der Einheitszelle	7
5.5	Design der Metaoberfläche.....	9
5.6	Demonstratoraufbau	11
5.7	Kammermessungen.....	13
5.8	Feldtest.....	15
6	Ergänzende Angaben.....	16
6.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
6.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	16
6.3	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	17
6.4	Fortschritt bei anderen Stellen.....	17
6.5	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	17
7	Quellenverzeichnis	18

1 Aufgabenstellung

In bisher fünf Generationen des zellularen Mobilfunks wurden stets Sender und Empfänger so angepasst, dass bei einem gegebenen Funkwellenausbreitungskanal die bestmögliche Übertragung erzielt wird. Die aktuelle 5. Generation setzt hierzu z.B. auf Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). Hierbei wird der vorhandene Übertragungskanal durch eine optimale Verteilung des Signals auf sehr viele Antennen der Basisstation und einer entsprechenden Auswertung an einer oder mehreren Antennen an der Mobilstation bestmöglich ausgenutzt. Zur Optimierung z.B. der Kanalkapazität werden hierzu unterschiedliche Ansätze der Belegung und Auswertung auf beiden Seiten des Übertragungssystems genutzt.

In jedem Fall ist die Optimierung allerdings durch den vorgegebenen Funkwellenausbreitungskanal begrenzt. So können z.B. durch Objekte abgeschattete Bereiche nur durch die Beleuchtung eventuell vorhandener Mehrwegekanäle erreicht werden. Insbesondere in Bezug auf immer weiter steigende Übertragungsfrequenzen wird dies zunehmend schwieriger.

Intelligente Metaoberflächen sind ein vielversprechender Ansatz, um insbesondere die Ausleuchtung in abgeschatteten Bereichen entscheidend zu verbessern: Basierend auf dem Funktionsprinzip eines Spiegels wird die Rekonfigurierbarkeit der Oberfläche genutzt, um eine einfallende elektromagnetische Welle in eine vorgegebene Richtung zu reflektieren. Mit einer solchen Lösung wäre es möglich, diese intelligenten Oberflächen optisch ansprechend in vorhandene Bebauung zu integrieren und trotzdem nahezu beliebige Kombinationen von Einfallswinkel/Ausfallswinkel zu erzielen.

Ziel dieses Projekts war daher, eine rekonfigurierbare Metaoberflächen-Architektur zu entwickeln und zu erproben, die eine möglichst hohe Flexibilität, Performance und Effizienz aufweist und gleichzeitig eine spätere industrielle Fertigung zu akzeptablen Kosten ermöglicht. Die erarbeitete Architektur soll dann als Technologiebasis zur Realisierung von industriellen Ausleuchtungslösungen für 6G-Mobilfunk zur Verfügung stehen.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt ReMoTe hatte eine Laufzeit von 36 Monaten und wurde kostenneutral um weitere 6 Monate verlängert. Im Folgenden wird der Arbeitsablauf anhand der relevanten Arbeitspakete dargestellt.

Management: Kommunikation. Koordination der Arbeiten.

Spezifikation der rekonfigurierbaren Metaoberfläche: Stand der Standardisierung und Aussichten. Anwendungsfälle für rekonfigurierbare Metaoberflächen in 6G. Spezifikationen für rekonfigurierbare Metaoberflächen in 6G.

Passives elektromagnetisches Design der Einheitszelle: Analyse der Konzepte für Einheitszellen. Implementierung von Modellierungswerkzeugen. Entwurf und Analyse der Einheitszelle für die weiteren Arbeiten.

Rekonfigurierbarkeitskonzept der Einheitszelle: Auswahl der Komponenten/Technologien zur Realisierung der Rekonfigurierbarkeit. Schaltungstechnische Modellierung. Laboraufbau.

Design der Metaoberfläche: Passive Struktur der Metaoberfläche. Schaltungstechnische Funktionalisierung zur Rekonfigurierbarkeit (Konzept/Simulation).

Demonstratoraufbau: Passive Struktur des Demonstrators (Entwicklung/Fertigung). Schaltungstechnische Funktionalisierung zur Rekonfigurierbarkeit (Entwicklung/Fertigung). Software.

Kammernmessungen: Ausarbeitung des Messkonzepts. Einrüsten der Messung. Durchführung der Messung.

Feldtest: Vorbereitung des Testbeds. Integration des Demonstrators in das Testbed. Charakterisierung des Demonstrators.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

3.1 Wissenschaftliches Umfeld und Situationsanalyse

In der Fachliteratur gibt es seit einigen Jahren Publikationen zum Einheitszellen-Design von Metaoberflächen und anormaler Reflexion dieser Oberflächen. Die verwendeten Einheitszellendesigns folgen hierbei vielfach keinem systematischen Ansatz, sondern setzen sich aus Variationen von bekannten Konzepten zusammen oder wurden gänzlich experimentell entwickelt. In einigen Fällen erfolgt eine Modellierung des Verhaltens auf Basis von grundlegenden kaskadierten Ersatzschaltbildern. In jüngerer Zeit erscheinen auch Veröffentlichungen zu rekonfigurierbaren Metaoberflächen mit anormaler Reflexion mittels schaltbarer oder tunebarer konventioneller Bauteile. Vereinzelt findet man hier auch ganze Demonstratoraufbauten. In den meisten Fällen erfolgt der Syntheseansatz aber keinem realistischen Anforderungsprofil. So erfolgt die Auswertung oft nur bei einer anscheinend willkürlich gewählten Frequenz und nicht in einem dedizierten Frequenzband. Zudem nimmt der Rekonfigurationsansatz und die Demonstratorrealisierung kaum Rücksicht auf eine Umsetzbarkeit in realen Mobilfunkszenarien; - so ist z.B. die Energieeffizienz der rekonfigurierbaren Oberfläche oft schon konzeptbedingt schlecht.

3.2 Wettbewerbssituation und Patentlage

Eine der Herausforderungen der 5G-Kommunikation mit mm-Wellen und auch zukünftig 6G-Anwendungen hängt mit der Signalausbreitung zusammen, die durch einen größeren Pfadverlust und eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Abschattungen gekennzeichnet ist. Die Abdeckung durch die Basisstationsantenne kann durch Gebäude, Wände oder andere Strukturen gestört werden, was zu blinden Zonen führt. Hier kann der Einsatz von rekonfigurierbaren Metaoberflächen zu einer signifikanten Verbesserung führen, wie verschiedene Studien zur Kanalkapazität zeigen. Derzeit bietet der Markt jedoch kein Produkt an, das speziell für die erforderlichen Frequenzbänder und mit einem angemessenen Scanbereich entwickelt wurde. Tatsächlich stammen die meisten verfügbaren Lösungen aus der akademischen Forschung, um die theoretischen Arbeiten zu verifizieren. Ansonsten werden von Industrieseite nur einige statisch reflektierende Oberflächen als Pionierlösungen präsentiert.

Aufgrund der hochinnovativen technischen Aspekte wurden in den letzten Jahren einige Patente für rekonfigurierbare Metaoberflächen eingereicht, deren Basis im Allgemeinen aber aus dem Reflectarray-Bereich stammt, somit also die hier untersuchten Strukturen nicht tangiert.

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der IMST GmbH (IMST) war das Institut für Hochfrequenztechnik und Funkssysteme der Leibniz Universität Hannover (LUH) sowie Ericsson Antenna Technology Germany (Ericsson) als Projektpartner beteiligt. Die Konsortialstruktur ergab sich wie folgt:

IMST war als KMU Koordinator dieser Aktivität. Von technischer Seite erfolgten insbesondere Designarbeiten und der folgende Demonstratoraufbau sowie die damit verbundenen Messungen.

Das Institut für Hochfrequenztechnik und Funkssysteme der Leibniz Universität Hannover legte seinen Forschungsfokus auf das passive elektromagnetische Design mittels Charakteristischer Moden. Aufgebaute Demonstratoren wurden mit einer angepassten Nahfeldmesstechnik und abschließend im Feldtest untersucht.

Ericsson als weltweit führender Anbieter von Kommunikationstechnologien hat in diesem Konsortium die industrielle Perspektive eingebracht. Im Rahmen dieser Aktivität betraf dies im Wesentlichen die Themen Spezifikation und Feldtest.

5 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die erzielten Ergebnisse für IMST dargestellt und der Vorhabensplanung gegenübergestellt.

5.1 Management

25.08.2022	Kick-off Meeting bei IMST GmbH, Kamp-Lintfort
26.09.2022	Einrichtung einer gemeinsamen Projekt-Cloud zum Austausch von Dokumenten und Informationen
ab 05.10.2022	monatliches virtuelles Treffen - Status-update
06.07.2023	Jahrestreffen bei EAG, Rosenheim
15.11.2023	Projekttreffen bei LUH, Hannover
14.05.2024	Jahrestreffen bei IMST GmbH, Kamp-Lintfort
11.02.2025	Projekttreffen bei EAG, Rosenheim
05.08.2025	Jahrestreffen inklusive Feldtest bei LUH, Hannover
20.01.2026	virtuelles Projektabschluss-treffen

5.2 Spezifikation der rekonfigurierbaren Metaoberfläche

Die in der Literatur diskutierten Ansätze zu rekonfigurierbaren Metaoberflächen (Reconfigurable Intelligent Surface - RIS) wurden evaluiert, Anwendungsfälle wurden analysiert und hieraus wurden dann RIS-Spezifikationen entwickelt:

Der – insbesondere im Hinblick auf einen Demonstrator – relevanteste Frequenzbereich umfasst 7,125 – 8,5 GHz. Das Frequenzband ist in Nutzkanäle mit einer Bandbreite von 200 MHz aufgeteilt. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass eine Phasenauflösung von 2 Bit (90° Phaseninkrement) bereits zu einer guten RIS-Performance führt. Die Energieversorgung soll über einen USB-C Port erfolgen. Bezüglich der Schaltzeiten können momentan keine abschließenden Anforderungen definiert werden, Szenarien schwanken von quasistatischen Verhältnissen bis hin zu Umschaltzeiten im Subsekundenbereich, wobei dann auch immer weitergehende Informationen aus dem Mobilfunknetz zur Umsetzung des Beamforming notwendig werden. Ein sinnvoller Scanbereich umfasst in der Elevation $\pm 20^\circ$ Abweichung von dem Reflexionswinkel eines ebenen Spiegels, im Azimuth liegt der Scanbereich bei $\pm 60^\circ$.

Im Hinblick auf einen möglichst modularen Ansatz wurde entschieden, dass Testschaltungen/Demonstrator auf Basis eines oder mehrerer Mikrocontroller aufgebaut werden. Dies bringt Kosten- und Implementierungsvorteile im Vergleich zu einer aufwändigen FPGA Umsetzung. Die limitierte Anzahl von verfügbaren GPIOs lässt sich durch Kaskadierung von mehreren Controllern praktisch beliebig steigern, was auch entsprechenden Einfluss auf die Schaltzeiten hat. Die Ansteuerung der rekonfigurierbaren Elemente erfolgt über separate D/A-Wandler und entsprechende – ggf. integrierte – Pegelumsetzer.

5.3 Passives elektromagnetisches Design der Einheitszelle

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde das elektromagnetische Design von Einheitszellen im IMST-eigenen Simulationstool EMPIRE XPU [3] integriert. Die Implementierung erfolgte auf Basis von [6] als „Parallel Plate H-Wall Simulator“. Beispielhaft ist in Abbildung 1 das Simulations-Setup für eine Einheitszelle auf Basis eines quadratischen Patches auf einem Substrat gezeigt, die umgebenden Randbedingungen zur Nachbildung periodischer Strukturen sowie die Anregungsrichtung der elektromagnetischen Welle.

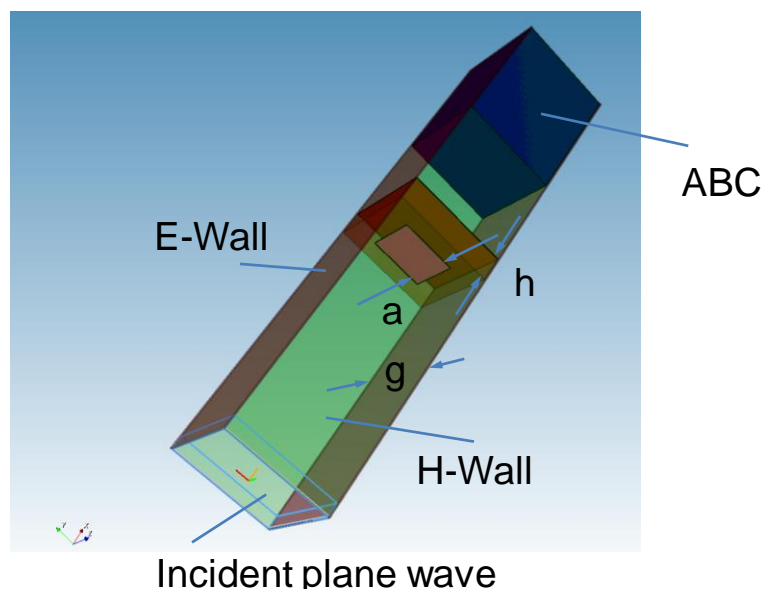


Abbildung 1: „Parallel Plate H-Wall Simulator“ Setup einer Einheitszelle auf Basis eines quadratischen Patches.

Ergebnis der Simulation ist die resultierende Phase und der Betrag des Reflektionsfaktors der in Normalenrichtung einfallenden ebenen Welle, die dann für den folgenden Entwurf der Metaoberfläche zugrunde gelegt werden können.

5.4 Rekonfigurierbarkeitskonzept der Einheitszelle

Eine der Hauptaufgaben dieser Forschungsaktivität war die Auswahl eines geeigneten Schaltungs-/Tuningelements für die Realisierung der Rekonfigurierbarkeit der Metaoberfläche. Für diese Evaluation wurden verschiedene Aspekte berücksichtigt, u.a. Tunability, Frequenzbereich, Quantisierungsfehler, Kosten, Integrationsaspekte und Ansteuerleistung.

In Tabelle 1 sind die Pros/Cons der vier betrachteten Schaltungs-/Tuningelemente detailliert zusammengefasst. Hierbei zeigt sich, dass für den anvisierten Frequenzbereich Varaktoren als Tuningelemente verschiedene Vorteile gegenüber den übrigen betrachteten Tuningelementen haben inklusive einfache Ansteuerung und Integration mit kontinuierlichem Tuning (keine Quantisierungsfehler). An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass für die Bewertung neben gängigen Tuningelementen (z.B. PIN-Dioden) auch neuartige Elemente berücksichtigt wurden, die in Studien erfolgversprechende Resultate zeigten (GeTe/GST Phase Change Materials). Hierbei zeigte sich, dass PIN-Dioden zwar exzellente HF-Eigenschaften und gute Integrierbarkeit zeigten, dies aber in Verbindung mit einem hohen Leistungsbedarf inkl. erhöhtem Quantisierungsfehler. GeTe/GST ist dagegen eine vielversprechende Technologie für HF Switching mit geringen Verlusten und geringen Leistungsanforderungen, aber die Technologie ist recht neu und Herstellung, Zuverlässigkeit und Kosten sind noch offene Punkte.

Liquid Crystal	
Pro	Con
Geeignet für Frequenzen bis in den THz- Bereich	Benötigt eine DC Ansteuerung auf Substratebene, nicht direkt auf der Metaoberfläche
Tuning der Permittivität: potenziell breitbandige TTD Anwendungen	Benötigt variable DC/analoge Ansteuerung (typischerweise mittlere/höhere Spannung)
Kontinuierliches Tuning (keine Quantisierungsfehler)	Fertigungstechnologie ist bekannt, aber kein Standard
Viele Designs im mmW-Bereich verfügbar	Beschränkter Tuningbereich
Geringer Ansteuerleistung bis in den THz Bereich	Langsame Schaltzeiten
	Unhandlich groß für den anvisierten Frequenzbereich

GST	
Pro	Con
SPST Schalter für Metaoberflächen mit guten HF-Eigenschaften	Technologie ist für mmW-Anwendungen noch im Entwicklungsstadium
Die Schalter können beliebig platziert werden	Benötigt eine analoge Ansteuerung (auch optisch möglich)
Geeignet für Anwendungen bis in den THz Bereich	Diskretes Tuning
Geringe Verluste bis in den THz Bereich	Kostenfrage ungeklärt, keine Standardbauteile verfügbar (nur wenige Firmen arbeiten an GeTe/GST Materialien)
Geringer Ansteuerleistung (benötigt lediglich Pulse)	SPST Verhalten führt zu erhöhten Quantisierungsfehlern
Kurze Schaltzeiten	

PIN Diode	
Pro	Con
Bewährte Technologie	DC Pfad ist Teil der Metaoberfläche
Geeignet für Frequenzen bis K-Band (kleine Gehäusebauformen verfügbar)	Entkopplung des DC Pfads von der HF führt zu beschränkter Bandbreite
SPST Schalter für Metaoberflächen mit guten HF-Eigenschaften	Die DC Verluste können recht hoch sein
Digitale Ansteuerung	Für die DC Versorgung wird positive und negative Spannung benötigt
Kostengünstig	RON ist klein (wenige Ohm), aber die Isolation im OFF Zustand ist beschränkt (~10dB)
Kurze Schaltzeiten	Intrinsisches SPST Verhalten führt zu erhöhten Quantisierungsfehlern

Varaktor	
Pro	Con
Bewährte Technologie	Teurer als PIN Dioden
Einfache Methode zur Beeinflussung der HF Ströme auf der Metaoberfläche	Frequenzbereich wird durch Serienwiderstand, Serieninduktivität und Streukapazität eingeschränkt (Ku Band)
Kontinuierliches Tuning	Benötigen variable DC Ansteuerung
Leistungsarme Ansteuerung	Tuning Bereich ist eingeschränkt
Kurze Schaltzeiten	

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Tuning-Technologien.

Nach Festlegung auf Varaktoren als Tuningelemente wurden zwei verschiedene Ansätze zur Generierung der Varaktorspannung identifiziert und getestet (s. Abbildung 2).

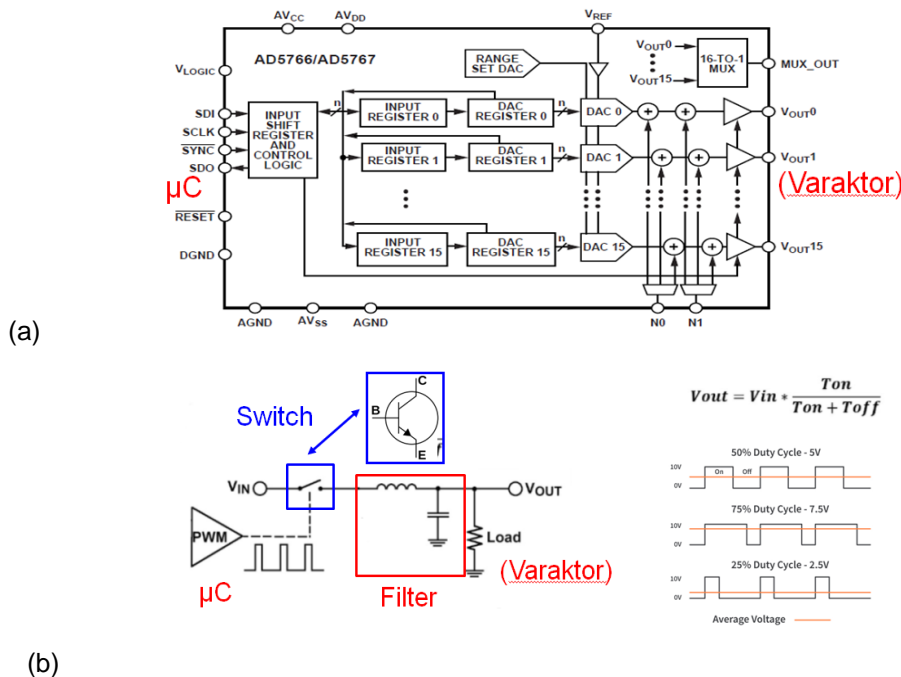


Abbildung 2: Methoden zur Generierung der notwendigen Varaktorspannungen. (a) DAC-basiert, (b) auf Basis einer PWM.

In Abbildung 2 (a) ist ein DAC-basierter Ansatz dargestellt, bei dem analoge Spannungen direkt aus einem Digital-Analog-Wandler erzeugt werden. In Abbildung 2 (b) ist eine PWM-basierte Lösung gezeigt, bei der aus einem pulswertenmodulierten Signal durch geeignete Aufbereitung eine einstellbare Steuerspannung entsteht.

Hierbei zeigte sich, dass die DAC-Lösung sehr empfindlich auf Änderungen der Versorgungsspannung reagierte, die Realisierung ist zudem teuer und bietet nur eine beschränkte Anzahl von Kanälen. Der PWM-basierte Aufbau ist dagegen deutlich kostengünstiger, zeigte sich im Betrieb als unkompliziert und ist in der Kanalanzahl einfach skalierbar. Insofern wurde entschieden, im Folgenden eine PWM-Realisierung umzusetzen.

5.5 Design der Metaoberfläche

Ziel des Arbeitspakets war das Design einer Metaoberfläche mit linear polarisierten Einheitszellen, bei der als Tuningelement ein Skyworks SMV1405-040LF Varaktor verwendet wird. Im Rahmen der Arbeiten wurde dieser Varaktor zunächst für den ausgewählten Frequenzbereich vermessen. Auf Basis dieser Charakterisierung wurde dann ein detailliertes Ersatzschaltbild erstellt.

Die Topologie basiert auf einem magneto-elektrischen Dipol mit Ringpatch zur Erhöhung der Bandbreite der Einheitszelle. Das Konzept ist in Abbildung 3 gezeigt, Ergebnisse wurden auf dem „2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation“ vorgestellt [7].

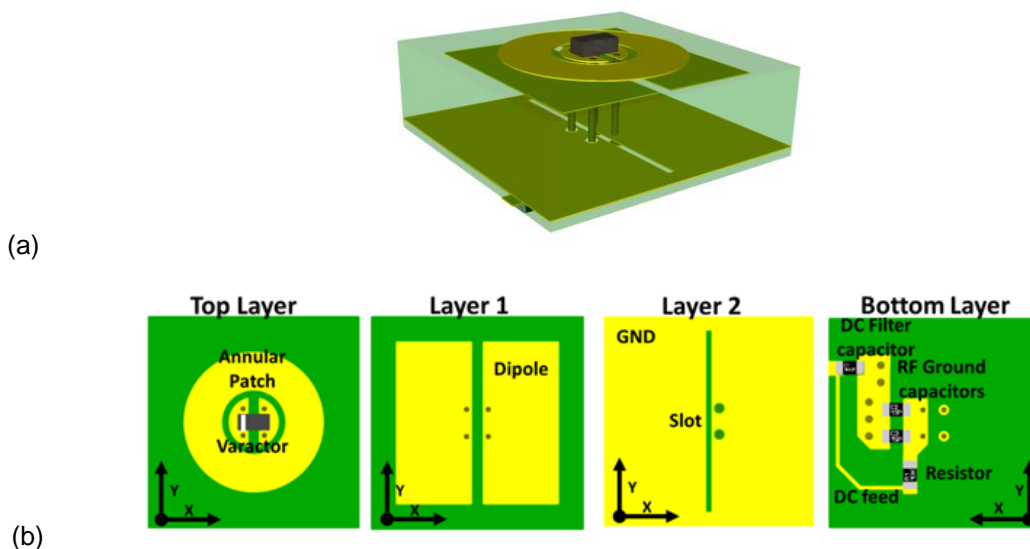


Abbildung 3: (a) Einheitszelle und (b) Lagenaufbau der untersuchten rekonfigurierbaren Einheitszelle mit Ringpatch.

Die Abbildung zeigt die geometrische Ausführung der entwickelten rekonfigurierbaren Einheitszelle sowie ihren Lagenaufbau, insbesondere den Ringpatch, die leitenden Strukturen und die Einbindung des Varaktors. Layer 1 beinhaltet die Dipolmetallisierung, Layer 2 einen Slot zur Verbesserung des Phasenhubs und der Bottom Layer die Bias-Strukturen.

Zur messtechnischen Charakterisierung wurde wie in Abbildung 4 gezeigt ein Hohlleitersimulator verwendet [4], der die Charakterisierung von Ausschnitten der späteren Metaoberfläche ermöglicht.

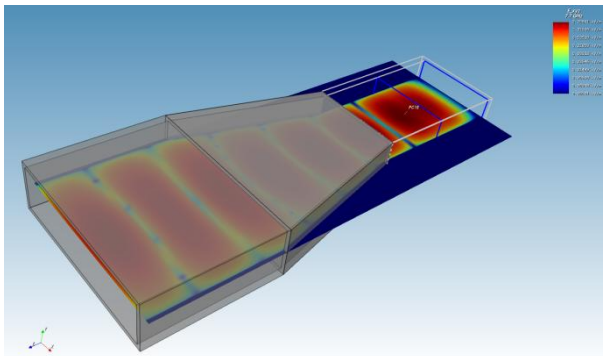


Abbildung 4: Hohlleitersimulator zur messtechnischen Charakterisierung von Metaoberflächen.

Hierbei wird das Reflektionsverhalten des betrachteten RIS-Ausschnitts unter definierten Randbedingungen in einem getaperten Rechteckhohlleiter untersucht. Neben den reduzierten Abmessungen hat dieses Verfahren insbesondere den Vorteil, dass hier im Labor leitungsgeführte Messungen durchgeführt werden können, bevor dann tatsächlich Freiraummessungen der vollständigen Struktur stattfinden.

In Abbildung 5 sind die simulierten und messtechnisch ermittelten Ergebnisse für den Reflektionsfaktor gegenübergestellt. Hierbei ist der Betrag und die Phase des Reflektionsfaktors für verschiedene Varaktorspannungen im Frequenzbereich von 5,5 GHz-9,5 GHz dargestellt. Die Kurvensätze verdeutlichen, wie sich die elektromagnetische Antwort der RIS durch unterschiedliche Bias-Spannungen abstimmen lässt. Der Phasenhub bei 7,7 GHz liegt oberhalb von 270°, dies ermöglicht die Umsetzung einer 2 Bit RIS.

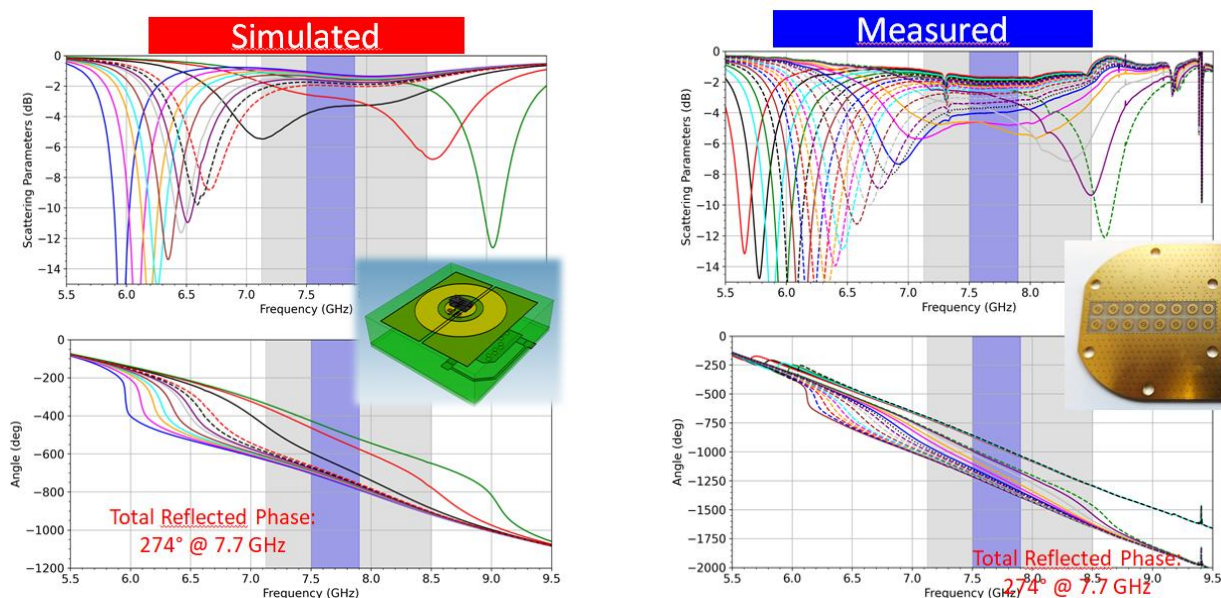


Abbildung 5: Vergleich des simulierten und gemessenen Reflektionsfaktors für die untersuchte Varaktoreinheitszelle bei verschiedenen Varaktorspannungen.

5.6 Demonstratoraufbau

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden zunächst zwei statische Panels auf Basis von Patchelementen für den Frequenzbereich 7,5 – 7,9 GHz entworfen. Die Größe der Einheitszelle beträgt 8 mm x 8 mm, das Array besteht aus 35 x 35 Einheitszellen (280 mm x 280 mm). Der Aufbau umfasst 2 Arrays, Array 1 liefert 45° horizontale Reflektion bei Welleneinfall aus Broadside (s. Abbildung 6), Array 2 zusätzlich zu 45° horizontaler Reflektion auch einen uptilt von 10°.

Die Auslegung der Periodizitäten des statischen Panels basiert auf den Designgrundlagen in der einschlägigen Literatur, die Patchgrößen der Einheitszelle wurden dann im Anschluss anhand von elektromagnetischen Simulationen mit Empire XPU ermittelt. Abbildung 6 verdeutlicht die räumliche Verteilung der Einheitszellen über das gesamte Panel und zeigt, wie durch gezielte Variation der Zellparameter eine definierte Phasenverteilung und damit ein gewünschter Reflektionswinkel erzeugt werden kann. Abschließend erfolgt dann eine Simulation des kompletten Arrays.

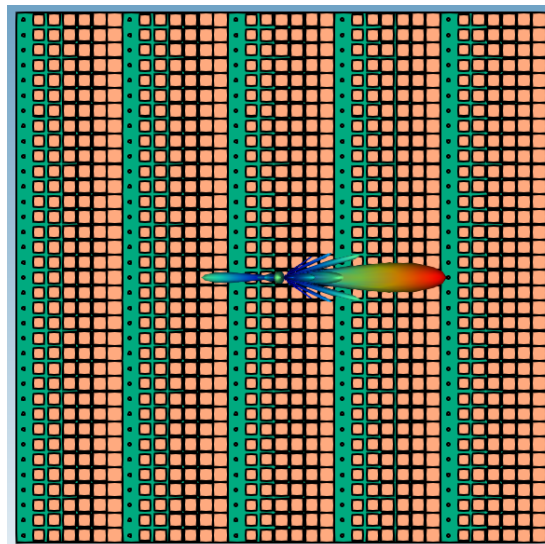


Abbildung 6: Statisches Panel mit 45° Reflektion im Azimut.

In einem weiteren Schritt wurde ein vollständiges RIS Panel realisiert. Das Panel basiert hierbei auf dem in Abbildung 7 gezeigten modularen Konzept.

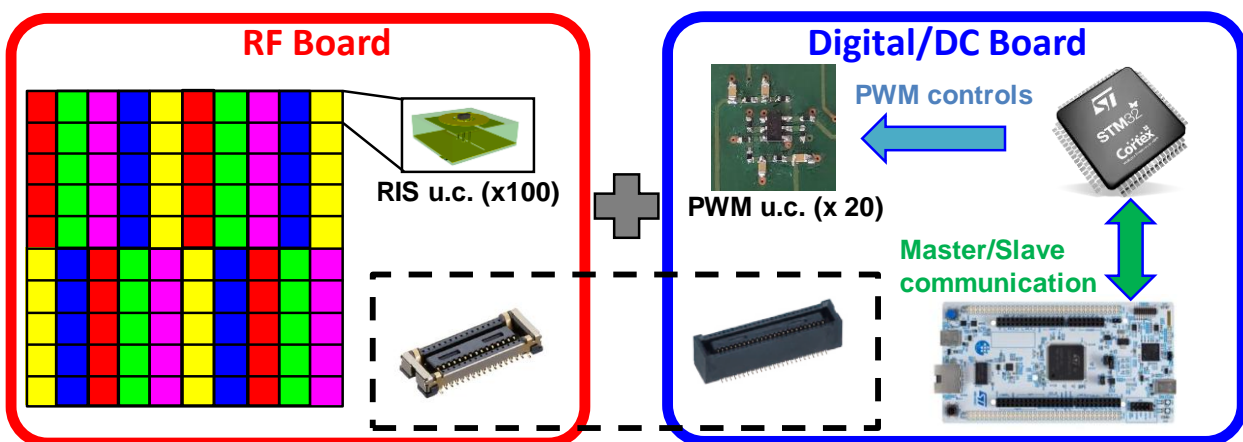


Abbildung 7: Modulares Konzept zur Realisierung des RIS Panels.

Das gesamte RF Panel wird in Subpanels von 10x10 Elementen unterteilt, die dann jeweils von einem Digital/DC Board angesteuert werden. Zur Sicherstellung der vollen Flexibilität im Azimut ist eine Ansteuerung jeder einzelnen Spalte im RF Subpanel vorgesehen, in der Elevation werden Gruppen von 5 Elementen gebildet, wodurch der Schwenkwinkel in der Elevation entsprechend reduziert ist. Abbildung 7 zeigt zudem die Trennung zwischen RF-Teil und Digital/DC-Teil sowie deren Zusammenspiel. Dadurch wird das Konstruktionsprinzip sichtbar, mit dem sich große, rekonfigurierbare Flächen effizient aufbauen, skalieren und ansteuern lassen.

Das aufgebaute RIS Panel besteht aus 30x30 Einheitszellen, Details sind in Abbildung 8 zusammengefasst. Die Abbildung zeigt die Leiterplattenlayouts des Hochfrequenzpanels und der zugehörigen Ansteuerelektronik. Auf dem RF-Panel sind die periodisch angeordneten Einheitszellen, HF-Leiterstrukturen und Kontaktierungen zu erkennen. Das Layout des Digital/DC-Boards zeigt die Komponenten zur Spannungsversorgung, Signalverarbeitung und Verteilung der Steuerspannungen auf die einzelnen Zellgruppen. Die Darstellung macht die physische Umsetzung des RIS-Konzepts auf Leiterplattebene nachvollziehbar.

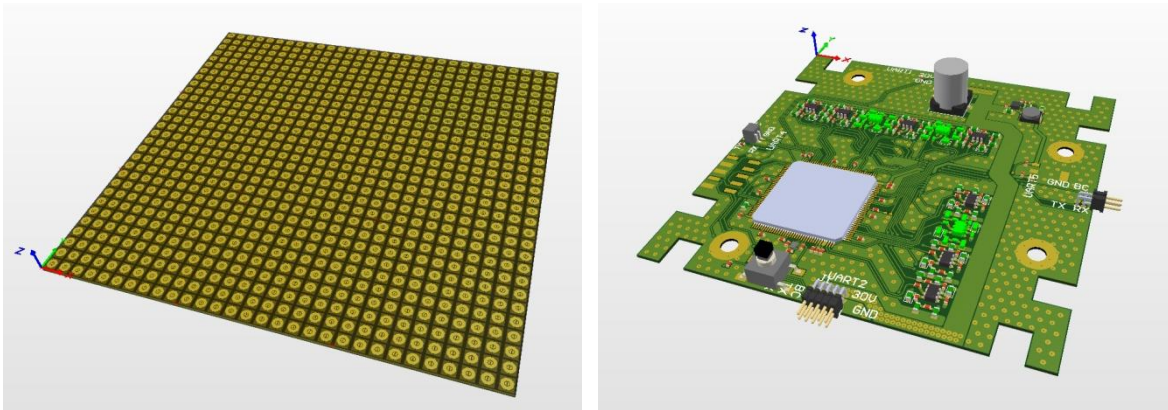


Abbildung 8: RIS Layouts des RF Panels und des Digital/DC-Boards.

Die hieraus resultierende Aufbau- und Verbindungstechnik ist in Abbildung 9 zusammengefasst. Zudem ist das hierarchische Steuerungskonzept mit der Kommunikation zwischen den Digital/DC Boards gezeigt:

Alle Boards haben dieselbe Firmware. Initialisierungs- und Kontrollbefehle werden lediglich an das erste Board gesendet. Die weitere Initialisierung/Kontrolle erfolgt „selbstorganisiert“, d.h. jedes Board kennt seine Position im Panel sowie die Größe des gesamten Panels. Auf Basis dieser Informationen können dann die notwendigen Spannungen für einen vorgegebenen Schwenkwinkel berechnet und gesetzt werden.

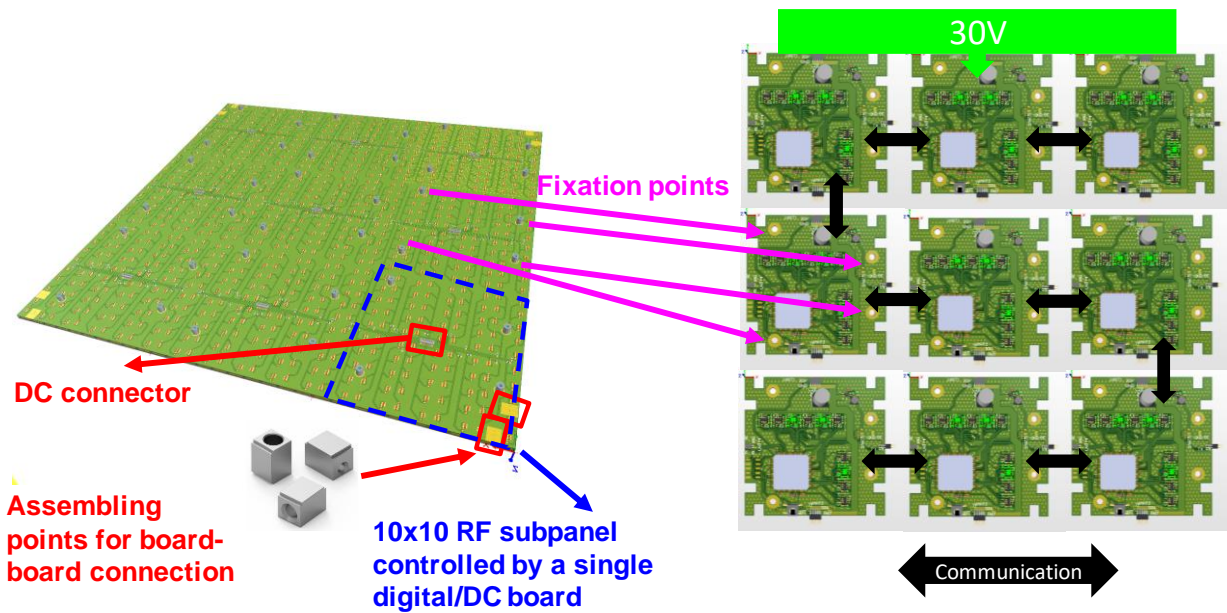


Abbildung 9: RIS Aufbau- und Verbindungstechnik.

5.7 Kammermessungen

Für die Messungen des statischen Panels wurde der in Abbildung 10 gezeigte Messaufbau für bistatische RCS-Messungen in der IMST Antennenmesskammer realisiert.



Abbildung 10: Messaufbau für bistatische RCS-Messungen in der IMST-Antennenmesskammer.

Hiermit ist es möglich, mit einer auf einer beweglichen Achse installierten Empfangsantenne horizontale Schnitte um das auf einem Positioner installierten Panel zu vermessen. Das einfallende Feld wird von einer feststehenden Sendeantenne erzeugt.

In Abbildung 11 ist der Vergleich der simulierten und gemessenen bistatischen, normierten RCS in der Horizontalebene des Panels für eine Frequenz von 7,7 GHz bei Welleneinfall von Broadside und horizontale Polarisation gezeigt. Die Ergebnisse zeigen die gewünschte 45° Reflektion und zudem die sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation.

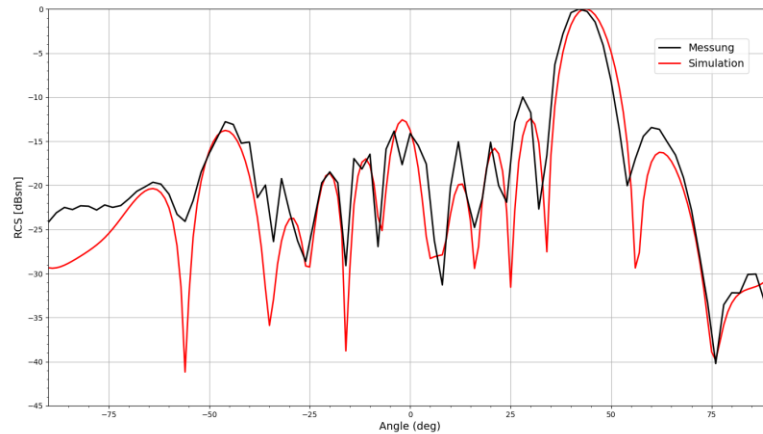


Abbildung 11: Vergleich der simulierten und gemessenen bistatischen, normierten RCS in der Horizontalebene des Panels.

Für die RIS-Messungen wurde ein neuartiger monostatischer Messaufbau verwendet, bei dem Senden und Empfangen aus derselben oder nahezu derselben Richtung erfolgen. Der Aufbau ist in Abbildung 12 gezeigt. Das RIS-Panel ist auf einem Positionier montiert, sodass die Rückstreuung des Panels im Azimut erfasst werden kann. Im Rahmen eines Postprocessings wird dann nach der Messung eine Transformation monostatisch-zu-bistatisch gemäß [2] durchgeführt.

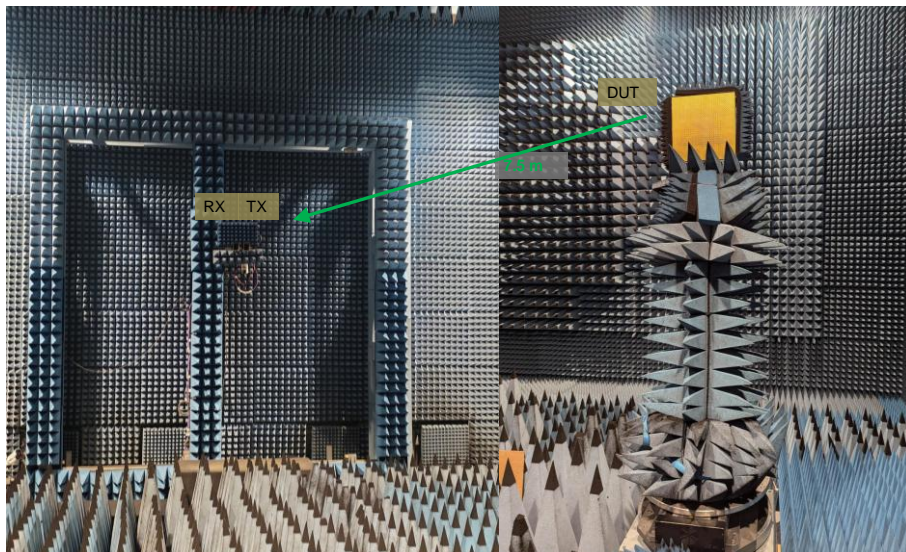


Abbildung 12: Monostatischer Messaufbau zur Vermessung des RIS Panels.

Als Referenz und zur Normierung der Ergebnisse wurde zudem eine Metallplatte mit denselben Abmessungen wie die RIS verwendet (s. Abbildung 13). Neben der sich einstellenden Radar Cross Section ist zudem auch das spiegelnde Reflektionsverhalten noch einmal veranschaulicht, das dann im Folgenden zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des rekonfigurierbaren Panels herangezogen werden kann.

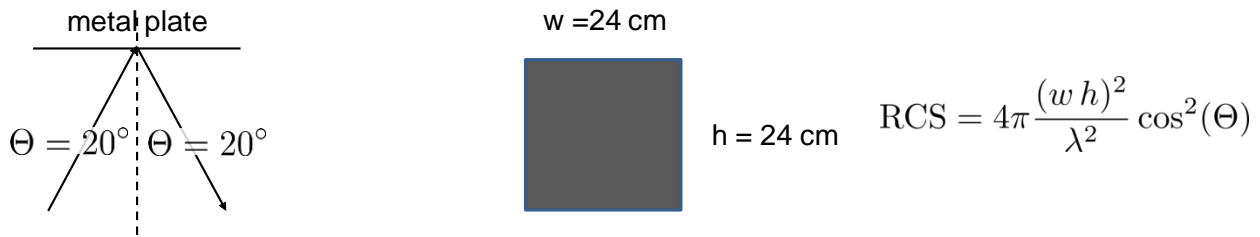


Abbildung 13: RCS einer Metallplatte.

Damit ergeben sich dann die in Abbildung 14 gezeigten Messergebnisse der bistatischen Radar Cross Section der RIS für mehrere eingestellte Scanwinkel bei 7,7 GHz. Die Metallplatte sorgt bei dieser Frequenz mit ihrer spiegelnden Reflektion für ein Maximum der RCS von 14,4 dBsm bei 0 Grad. Für die RIS wurden 4 Konfigurationen untersucht: 15°, 30°, 45° und 60° Scanwinkel. Alle Scanwinkel finden sich direkt in den Messwerten wieder und demonstrieren damit die aktive Strahlschwenkung beziehungsweise die Umlenkung der reflektierten Welle durch die RIS. Die Messergebnisse zeigen zudem die gutmütigen Verlusteigenschaften der RIS, insbesondere unter Berücksichtigung der Verluste beim Scannen mit zunehmendem Schwenkwinkel.

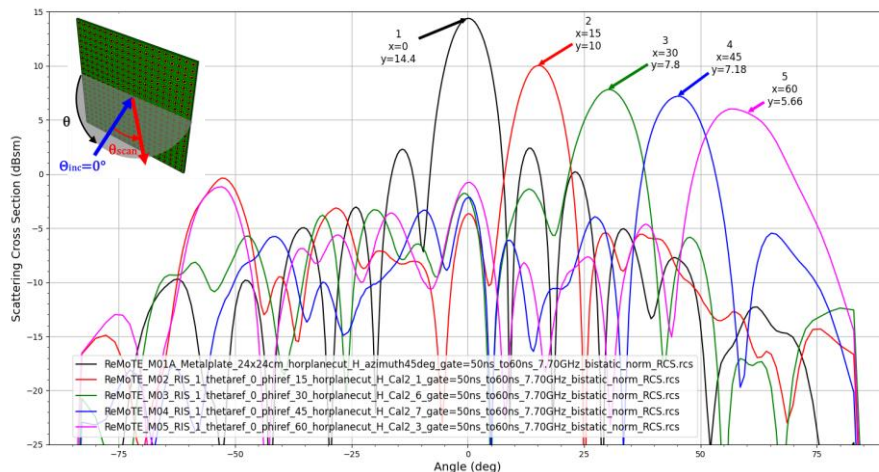


Abbildung 14: Bistatische RCS der RIS bei Welleneinfall aus Broadside.

5.8 Feldtest

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde messtechnisch untersucht, inwiefern die RIS Anwendung im Non-Line-of-Sight (NLOS) Fall zu einer Verringerung des Pfadverlusts beitragen kann. Die Messungen mit dem in Kapitel 5.6 gezeigten IMST RIS Demonstrator haben auf dem Dach eines Universitätsgebäudes der LUH stattgefunden (s. Abbildung 15) und wurden gemeinsam von den Projektpartnern durchgeführt.

Für die CW-Messungen bei 7,7 GHz wurde ein Signalgenerator mit 10 dBm Ausgangsleistung verwendet und die LoS-Verbindung zwischen Sender/Empfänger – ausgestattet mit dual polarisierten Hornantennen - war in allen Fällen durch ein Gebäude blockiert. Ausgewertet wurden 3 Szenarien: 1. NLOS Empfangspegel, 2. Empfangspegel bei Einsatz einer Metallplatte an Stelle einer RIS, 3. Konfigurierte RIS.

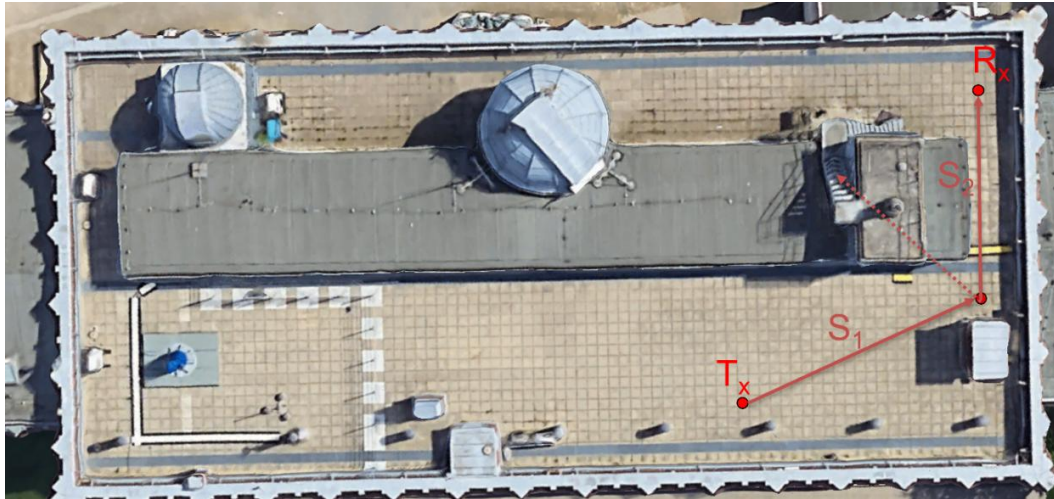


Abbildung 15: Messszenario auf dem Dach eines LUH Universitätsgebäudes.

Exemplarisch ergaben sich für die Messkonfiguration gemäß Abbildung 16 folgende Empfangspegel: NLOS -75 dBm, Metallplatte -76 dBm, RIS- 63 dBm; d.h. durch den Einsatz der RIS konnte der Empfangspegel um 12 dB verbessert werden. Diese Verbesserung konnte in weitergehenden Messungen bestätigt werden.

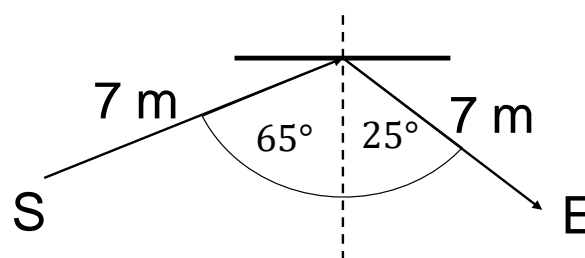


Abbildung 16: Nichtspiegelnde Reflektion planar: spitzer Winkel.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz der RIS eine signifikante Kanalverbesserung erzielt werden konnte. Diese Verbesserung liegt im Rahmen der Erwartungen auf Basis der Simulationen/Kammermessungen.

6 Ergänzende Angaben

6.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die zur Verfügung stehenden Mittel wurden im Rahmen der Aktivität hauptsächlich für Personalkosten der wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr. Achim Bahr, Matthias Arnold, Jochen Mosig und Dr. Enrico Tolin verwendet. Darüber hinaus fielen Materialkosten zum Aufbau von Demonstratoren und Reisekosten insbesondere für die in Präsenz abgehaltenen Projekttreffen an.

6.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Durch die Arbeit der Projektpartner konnte das im Kapitel „Aufgabenstellung“ genannte Ziel des Vorhabens erreicht werden. Hierbei wurde in allen Phasen des Projekts auf ressourcenschonende und effiziente Weise gearbeitet. Der Aufwand war jederzeit den hohen Qualitätsstandards angemessen.

Der Verlauf des Projekts folgte weitestgehend der Vorhabensplanung und die festgelegten Arbeitspakete konnten erfolgreich bearbeitet werden. Gegenüber der ursprünglichen Planung musste die Projektlaufzeit um 6 Monate verlängert werden. Grund hierfür waren Sanierungsarbeiten an dem Gebäude, in dem sich das Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme der Universität Hannover befindet und damit einhergehende Verzögerungen. Inhaltliche Veränderungen waren nicht notwendig.

Ergänzende Zuwendungen und Ressourcen waren für die Erreichung der Projektziele nicht notwendig.

6.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die IMST-Verwertungsstrategie umfasst mehrere Modelle: die Verwertung im Sinne der Entwicklungsdienstleistung, die Generierung und Vermarktung von Intellectual Property sowie die Realisierung von B2B-Produkten außerhalb des 6G-Bereichs.

Im Sinne dieser Verwertungsstrategie sind die erzielten Projektergebnisse von großem Nutzen: Die gute Performance der aufgebauten RIS Demonstratoren hat bereits zu Umsätzen im Bereich Entwicklungsaufträge geführt, IMST sieht aber noch weitergehendes Potenzial insbesondere zur Anwendung von rekonfigurierbaren Metaoberflächen im Bereich Reflectarray sowie sichere Kommunikation und Sensorik. Hierzu wird momentan auch Intellectual Property generiert.

6.4 Fortschritt bei anderen Stellen

Im Rahmen eines ebenfalls vom BMBF geförderten Projekts (16KISK136K and 16KISK143) wurde von Bette et al. [2] ein neues Messverfahren zur Vermessung von RIS Strukturen vorgestellt, das dann im Folgenden auch im Rahmen dieses Projekts angewendet wurde. Das Verfahren bietet insbesondere Vorteile bzgl. der Vereinfachung des Messaufbaus für einen größeren bistatischen Öffnungswinkelbereich.

Ansonsten sind von dritter Seite bisher keine neuen Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

6.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Das Design der Metaoberfläche mit Varaktordioden wurde im Rahmen eines Konferenzpapers veröffentlicht [7]. Hierbei wurden insbesondere die Maßnahmen zur Erhöhung der Bandbreite diskutiert. Zum Thema Messungen wurde ein Konferenzpaper veröffentlicht [5], in dem eine einfache monostatische RIS Qualifizierung vorgeschlagen und ein metallischer Reflektor als Referenz eingesetzt wurde.

Geplant und akzeptiert ist außerdem eine Veröffentlichung auf der EuCAP 2026 [1] zu einem neuartigen 3-Bit RIS Konzept im FR3 Band bei 7,125 – 8,4 GHz mit geringen Verlusten und gleichzeitig großen Phasenhub. Die finale RIS zeigt hierbei ein stabiles Scanverhalten bis 50° bei einer maximalen Performanceeinbuße von -1,1 dB im Vergleich zum theoretischen Scanverlust.

7 Quellenverzeichnis

- [1] K. Aktas, E. Tolin, A. Bahr, F. Vipiana: " Low-Loss Reflective Intelligent Surface Based on Polarization-Rotation for 6G FR3 Band Applications ", accepted for publication: EuCAP 2026 20th European Conference on Antennas and Propagation, Dublin, Ireland, 2026.
- [2] F. Bette, O. Kasap, T. Gemmer, F. Muhr, F. Röhr, H. Bartko, B. Derat, W. Keusgen: "Extension of Falconer's Monostatic to Bistatic Equivalence Theorem with Respect to Reconfigurable Intelligent Surface Testing", 2025 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting (AP-S/CNC-USNC-URSI), Ottawa, ON, Canada, 2025, pp. 2794-2797, doi: 10.1109/AP-S/CNC-USNC-URSI55537.2025.11266486.
- [3]EMPIRE XPU, Version 9.2.0, IMST GmbH, Kamp-Lintfort, Germany, Dec. 2025. [Online] Available: <http://www.empire.de/>
- [4]P. Hannan and M. Balfour, "Simulation of a phased-array antenna in waveguide", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 13, no. 3, pp. 342-353, May 1965, doi: 10.1109/TAP.1965.1138428.
- [5]S. Otto, A. Bahr, J. Kunisch, D. Schaefer, M. Willemsen, F. T. Bette, T. M. Gemmer, and H. Mellein, "A mono-static RIS qualification method introducing an ideal metal reflector as reference," 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 2024, pp. 2577–2578, doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686832.
- [6]H. Rajagopalan and Y. Rahmat-Samii, "On the Reflection Characteristics of a Reflectarray Element with Low-Loss and High-Loss Substrates", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 73-89, Aug. 2010, doi: 10.1109/MAP.2010.5638237.
- [7]E. Tolin and A. Bahr, "Phase Stable 2-Bit Reconfigurable Reflective Metasurface for 6G Wireless Communications," 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 2024, pp. 1183-1184, doi: 10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686491.