

# Radar-Sounder zur Erkundung der Eismonde von Jupiter

Förderkennzeichen: 50 QJ 1901

Prof. Dr.-Ing. Dirk Plettemeier 

Schlussbericht

# Radar-Sounder zur Erkundung der Eismonde von Jupiter

Förderkennzeichen: 50 QJ 1901

Prof. Dr.-Ing. Dirk Plettemeier 

## Schlussbericht

Eingereicht am: 22. Januar 2024

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Zeichen, Benennungen und Einheiten	vii
<b>1 Kurze Darstellung</b>	1
1.1 Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2 Voraussetzungen . . . . .	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens . . . . .	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand . . . . .	2
1.4.1 Benutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	3
1.4.2 Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste . . . . .	3
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	3
<b>2 Eingehende Darstellung</b>	4
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse . . . . .	4
2.1.1 Untersuchung eines vereinfachten Antennenmodells mit mittlerer Leitfähigkeit . . . . .	5
2.1.2 Analyse des Einflusses unterschiedlicher Kabellängen auf die Gesamtperformance . . . . .	5
2.1.3 Untersuchung der Harmonischen in Hinblick auf Elektromagnetische Interferenzen . . . . .	6
2.1.4 Analyse verschiedener Entwürfe des Anpassnetzwerks und dessen Einfluss auf die Performance . . . . .	7
2.1.5 Toleranzanalyse hinsichtlich eines Ungleichgewichts bei Amplitude und Phase . . . . .	7
2.1.6 Analyse der abgewinkelten Konfiguration des Speiseports . . . . .	8
2.1.7 Untersuchung der Auswirkung einer Graphenbeschichtung auf der Antenne . . . . .	9
2.1.8 Python-Code zur schnellen Analyse der Performance des Anpassnetzwerkes . . . . .	9
2.1.9 Antennenleitfähigkeit: worst-case und best-case Analyse . . . . .	12

## *Inhaltsverzeichnis*

---

2.1.10	Charakterisierung der dummy loads . . . . .	12
2.1.11	De-embedding des Antennensimulators . . . . .	13
2.1.12	Berechnung der Referenzfunktion . . . . .	14
2.1.13	Einfluss des Antennensimulators auf das Chirp-Signal . . . . .	14
2.1.14	Systemsimulator . . . . .	16
2.1.15	Überprüfung der STI-Performance-Tests . . . . .	17
2.1.16	Feldtests bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig . . . . .	18
2.1.17	Messung des skalierten S/C-Modells im Maßstab 1:18 . . . . .	19
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . . .	21
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	21
2.4	Voraussichtlicher Nutzen . . . . .	22
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen . . . . .	23
2.6	Veröffentlichungen des Ergebnisses . . . . .	23
	<b>Literatur</b>	<b>25</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Impedanzvergleich zwischen dem geschichteten und dem homogenen Simulationsmodell bei einem Solarpanelwinkel $\alpha_{SP}$ von $90^\circ$ . . . . .	6
2.2	Kabelkonfiguration zwischen dem Verstärkerausgang (PA) und dem Antenneneingang (ANT) . . . . .	6
2.3	Auswirkung unterschiedlicher Kabellängen auf die Performance der Antenne mit Anpassnetzwerk. . . . .	7
2.4	Gewinn in Nadirrichtung mit Anpassnetzwerk. . . . .	8
2.5	Resistanz und Reaktanz des RIME-Dipols bis 50 MHz, um den Einfluss der zweiten und dritten Harmonischen auf die von RIME erzeugten elektromagnetischen Störungen zu untersuchen. . . . .	9
2.6	Maximaler Verlust beim Gewinn in Nadirrichtung, wenn ein bestimmtes Ungleichgewicht bei der Amplitude und der Phase, in Bezug auf die Nominalwerte, zwischen den beiden Antennenports vorliegt. . . . .	10
2.7	Vergleich der Eingangsimpedanz für verschiedene Konfigurationen der Speisestelle und einen Solarpanelwinkel von $90^\circ$ . . . . .	10
2.8	Absoluter Gewinn der Antenne in Nadirrichtung mit Anpassnetzwerk und Kabeln. . . . .	11
2.9	Auswirkung der Graphenbeschichtung auf die Antenneneffizienz und den Gewinn in Nadirrichtung für einen Solarpanelwinkel von $90^\circ$ . . . . .	11
2.10	Blockschaltbild der einzelnen S-Parameterblöcke mit Anpassnetzwerk und Antenne. . . . .	12
2.11	Vergleich des Gewinns in Nadirrichtung für unterschiedliche Leitfähigkeiten und Solarpanelwinkel. . . . .	13
2.12	Blockschaltbild des Designs der dummy loads mit Combiner. . . . .	13
2.13	Blockschaltbild des kompletten Antennensimulators mit CMN, TMN und den dummy loads. . . . .	14
2.14	Übertragungsverhalten für eine Pulsdauer von 50 $\mu\text{s}$ und eine Bandbreite von 1 MHz . . . . .	15
2.15	Schemata für den Sende- und Empfangspfad. . . . .	16
2.16	Gemessenes TX-Signal für eine ausgewählte Konfiguration und die Verzerrung des idealen Chirp-Signals durch das System. . . . .	17

## *Abbildungsverzeichnis*

---

2.17	Berechnete nichtlineare Verzerrung der Phase im Tx- und Rx-Pfad. . . . .	18
2.18	JUICE mit Antennencharakteristik bei 9 MHz. . . . .	18
2.19	Reinraum bei STI mit EQM der Antenne auf Metallgestell gelagert. . . . .	19
2.20	Bestimmung der Eingangsimpedanz eines Antennenarms von RIME auf dem Messgelände des PTBs in Braunschweig. . . . .	20
2.21	Eingangsreflexionsfaktor - Messung vs. Simulation . . . . .	21
2.22	Für die modellskalierten Messungen am Lehrstuhl HF entworfenes Modell des S/Cs im Maßstab 1:18. . . . .	22
2.23	S/C mit verwendeter Widerstandskonfiguration. . . . .	22
2.24	Foto des detaillierten, skalierten Modells im Maßstab 1:18 mit einem Solarpanelwinkel von 0° in der HERTZ-Messkammer des ESTEC. . . . .	23
2.25	Vergleich des absoluten Gewinns zwischen Messung und Simulation für einen Solarpanelwinkel von 90°. In diesem Fall steht die Antennenachse senkrecht auf der von den Solarpanel aufgespannten Ebene . . . . .	24

# Zeichen, Benennungen und Einheiten

## Akronyme

APN	Anpassnetzwerk
AS	Antenna Simulator
CMN	Central Matching Network
EMI	Elektromagnetische Interferenz
EQM	Engineering Qualification Model
ESA	European Space Agency
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JUICE	Jupiter Icy Moon Explorer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PA	Power Amplifier
PI	Principal Investigator
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RIME	Radar for Icy Moon Exploration
S/C	Raumfahrzeug
TMN	Terminal Matching Network
TUD	Technische Universität Dresden
VTF	Voltage Transfer Function

## **Symbolverzeichnis**

$H_{AS}(f)$	Übertragungsfunktion des Antennensimulators
$\alpha_{SP}$	Drehwinkel der Solarpanel
$R_{SC}$	Widerstand zwischen Raumfahrzeug und Solarpanel
$R_{SP}$	Widerstand zwischen den Elementen des Solarpanel

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Radar for Icy Moon Exploration (RIME) ist ein Radar-Sounder, der für die Untersuchung des Untergrunds der Monde Ganymed, Europa und Kallisto bis in eine Tiefe von 9 km entwickelt wurde. Um diese Tiefe zu erreichen, arbeitet das Radarsystem im Frequenzbereich von 7,5 MHz bis 10,5 MHz. Dadurch sollen neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Geologie und Geophysik der vereisten Monde gewonnen werden. Der Radar-Sounder ist in Richtung der Oberfläche orientiert und strahlt elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich ab, der eine hohe Eindringtiefe in den Untergrund ermöglicht. Die eingedrungene Welle durchläuft die verschiedenen Schichten im Untergrund, wobei sie an den Übergängen von Schichten mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften unterschiedlich stark reflektiert wird. Die Stärke der Reflexion ist abhängig vom Unterschied der relativen Permittivität aneinanderliegender Schichten, d.h. von deren Kontrast. Das zurückgestreute Signal wird vom Radar-Sounder detektiert und dazu genutzt, ein Bild des Untergrunds zu erzeugen.

Der Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik unterstützt die Entwicklung des Antennensystems mit wissenschaftlichen Analysen, stellt die Einhaltung der im *Antenna Requirement Document* definierten Vorgaben sicher und unterstützt die Projektpartner bei Messungen und Analysen. Außerdem erfolgt der Entwurf des finalen Anpassnetzwerkes am JPL auf der Basis von Simulationsdaten, die vom Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren ist der Lehrstuhl an Feldtests, Messungen und der wissenschaftlichen Auswertung der erzielten Ergebnisse maßgeblich beteiligt.

## 1.2 Voraussetzungen

Der Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der TU Dresden verfügt über umfangreiche Erfahrung im Bereich Antennen-, System- und Schaltungsdesign sowie auf dem Gebiet der Satellitentechnik und Radar-Fernerkundung. Die Hauptanwendungen sind Projekte aus der Luft- und Raumfahrt sowie die ultraschnelle Datenübertragung in der modernen drahtlosen Kommunikationstechnik. Neben den zahlreichen Raumfahrtprojekten, ESA und NASA Missionen, wie z. B. ExoMars, MARS2020, EnVision und JUICE ist der Lehrstuhl Hochfrequenztechnik beispielsweise eingebunden in das Projekt GERKI (radarbasierte lautlose Spracherkennung), 6G-life, in das Forschungscluster E4C (extrem energieeffiziente Edge Cloud Hardware) sowie in das Else Kröner Fresenius-Zentrum für Digitale Gesundheit (EKFZ).

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde bereits in der Antragsphase mit einem Zeitplan strukturiert. Während der Projektphase gab es geringfügige Änderungen beim Ablauf, auf die flexibel reagiert wurde. Die Planungen wurden in enger Abstimmung mit den anderen Partnern ausgeführt. Alle geplanten Arbeiten seitens der TUD wurden zum Projektende abgeschlossen.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurde der aktuelle Stand der Technik in entsprechenden Fachzeitschriften recherchiert. Radar-Sounder mit einer dipolartigen Antennenkonfiguration sind das Experiment MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding) an Bord der Mission MarsExpress [Seu+04] und SHARAD (Mars SHAllow RADar sounder) an Bord des Mars Reconnaissance Orbiter [Jor+09]. Beide Experimente unterscheiden sich allerdings hinsichtlich des verwendeten Frequenzbereichs und der Konstruktion des Antennensystems. Die bei RIME entwickelte Antenne besteht aus einem ultra-leichten Kohlefasermaterial. Die Gelenke verwenden eine neuartige Technologie, die ohne metallische Komponenten auskommt [Spa19]. Aufgrund der innovativen Konstruktion existieren keine vergleichbaren Antennensysteme.

### **1.4.1 Benutzte bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte**

Für das Vorhaben wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte benutzt.

### **1.4.2 Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste**

Der Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen wurden in einschlägigen Fachzeitschriften und Konferenzberichten recherchiert. Eine wichtige Quelle im Bereich der Antennenentwicklung stellten dabei die Veröffentlichungen beim Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) dar.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde mit verschiedenen Partnern zusammengearbeitet. Zu den Partnern gehören:

- Universität Trient: Projektleitung (PI)
- SpaceTech GmbH (STI): Entwicklung und Bau des Antennensystems
- AIRBUS: Bau des kompletten Raumfahrzeugs (S/C)
- NASA JPL: Entwicklung und Bau des Anpassnetzwerkes (Co-PI)

Die Untersuchungen wurden in enger Abstimmung mit den anderen Projektpartnern durchgeführt. Des Weiteren erfolgte die Vorstellung und Diskussion des aktuellen Stands der Ergebnisse bei regelmäßigen Telefon- und Videokonferenzen. Außerdem erfolgten mehrere Treffen bei den Projektpartnern, um Fortschritte und zukünftige Arbeiten zu erörtern sowie Feldtests vorzubereiten.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Der Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der TU Dresden führte im Rahmen der ESA-Mission Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) wissenschaftliche Untersuchungen in Hinblick auf das Design und die Leistungsfähigkeit des Antennensystems für das Untergrundradar RIME durch. Der Fokus lag auf der Einhaltung der im *Antenna Requirement Document* spezifizierten Randbedingungen, um das Erreichen der wissenschaftlichen Arbeitsziele zu gewährleisten. Des Weiteren wurde die Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Antennensystems angestrebt. Aus diesem Grund erfolgten umfangreiche Analysen, die im Folgenden beispielhaft genannt sind.

1. Auswirkungen unterschiedlicher Kabellängen und -typen auf die Leistungsfähigkeit des Antennensystems
2. Unterstützung des Jet Propulsion Laboratory (JPL) beim Entwurf des Anpassnetzwerkes und der Dummy Loads
3. Auswirkungen der Antennenleitfähigkeit auf die wissenschaftlichen Arbeitsziele
4. Bestimmung der Transfer- und Referenzfunktion des Radar-Sounders
5. Erstellung eines Antennensimulators
6. Feldtests und Messkampagnen

Des Weiteren wurde das Simulationsmodell kontinuierlich an die aktuellen Designänderungen angepasst. Dies umfasst Änderungen des S/C-Designs, die Platzierung und Ausrichtung anderer Experimente sowie die Weiterentwicklung des Antennensystems.

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der geleisteten Arbeiten gegeben, wobei exemplarisch einige Analysen detailliert erläutert werden.

### 2.1.1 Untersuchung eines vereinfachten Antennenmodells mit mittlerer Leitfähigkeit

Aufgrund des komplexen Aufbaus des Antennenmodells wurde von der ESA ein vereinfachtes Simulationsmodell angestrebt. Dabei wird der geschichtete Aufbau durch einen homogenen Hohlzylinder approximiert. Dieser Hohlzylinder aus einem homogenen Material soll die 250  $\mu\text{m}$  dicke CFRP- und 50  $\mu\text{m}$  dicke Silberstruktur elektrisch nachbilden, um eventuelle Fehlerquellen im Simulationsmodell, z. B. beim Mesh, zu reduzieren. Die Leitfähigkeit des CFRPs beträgt dabei  $13\,900\,\text{S}\,\text{m}^{-1}$ , die des Silbers  $96\,\text{MS}\,\text{m}^{-1}$ . Umfangreiche Untersuchungen mit verschiedenen effektiven Leitfähigkeitswerten haben allerdings gezeigt, dass mit einer homogenen Struktur das Verhalten des RIME-Dipols nicht zufriedenstellend nachgebildet werden kann. Es besteht die Möglichkeit, entweder die Impedanz oder den Gewinn in Nadirrichtung innerhalb des verwendeten Frequenzbereichs mit einer vernachlässigbaren Abweichung nachzubilden. Eine Übereinstimmung beider Größen wird jedoch nie erreicht. Das Ergebnis des Vergleichs zwischen einer homogenen Antennenstruktur mit einer Leitfähigkeit von  $581\,\text{kS}\,\text{m}^{-1}$  und dem Vollmodell sind in der Abb. 2.1 ersichtlich. In dieser Abbildung ist die Summe der Impedanzen von Port 1 und Port 2 dargestellt.

### 2.1.2 Analyse des Einflusses unterschiedlicher Kabellängen auf die Gesamtperformance

Zwischen dem Ausgang des Verstärkers und den Eingangssports der Antenne existieren vier Abschnitte, die mit Koaxialkabeln unterschiedlicher Länge miteinander verbunden sind. Es gibt den Abschnitt zwischen dem Power Amplifier (PA) und dem Central Matching Network (CMN), den Abschnitt zwischen dem CMN und dem Terminal Matching Network (TMN) sowie das letzte Stück zwischen dem TMN und der Antenne. Diese Konfiguration zeigt Abb. 2.2. Aufgrund der Tatsache, dass die verschiedenen Komponenten keinen Eingangs- bzw. Ausgangswiderstand von exakt  $50\,\Omega$  aufweisen, bewirken die Kabel eine Widerstandstransformation in Abhängigkeit von ihrer Länge. Dadurch kann die Gesamtperformance des Systems beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund wurde der Einfluss von minimaler, maximaler und nominaler Kabellänge untersucht. Die Ergebnisse dienen der ESA und dem JPL als Kriterium für die Akzeptanz von Abweichungen in Bezug auf die vordefinierte Länge.

Darüber hinaus wurden zu einem späteren Zeitpunkt des Projektes weitere Analysen notwendig, weil die Länge der gelieferten, finalen Koaxialkabel geringfügig von der bestellten Länge abweicht. Außerdem verwendete das JPL ein anderer Kabeltyp für die Tests. Die in Abb. 2.3 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen und damit deren Einfluss auf die Performance vernachlässigbar sind.

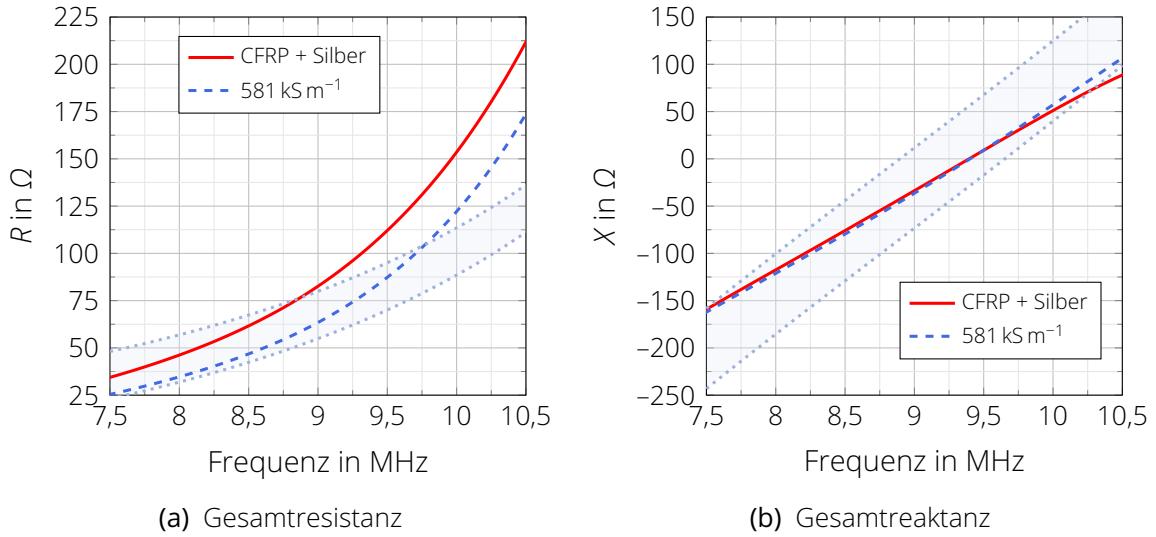


Abbildung 2.1: Impedanzvergleich zwischen dem geschichteten und dem homogenen Simulationsmodell bei einem Solarpanelwinkel  $\alpha_{SP}$  von 90°.

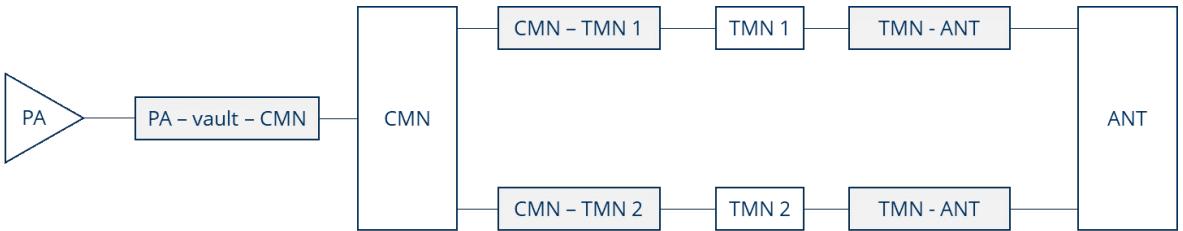


Abbildung 2.2: Kabelkonfiguration zwischen dem Verstärkerausgang (PA) und dem Antenneneingang (ANT).

### 2.1.3 Untersuchung der Harmonischen in Hinblick auf Elektromagnetische Interferenzen

Für Untersuchungen hinsichtlich der Elektromagnetische Interferenz (EMI) war es notwendig, die zweite und dritte Harmonische zu berechnen. Aus diesem Grund wurde der Frequenzbereich von den sonst üblichen 7,5 MHz bis 10,5 MHz auf 6 MHz bis 50 MHz erweitert und die Ergebnisse dem JPL für weitere Untersuchungen zu Verfügung gestellt. Die Ergebnisse für die Impedanz bei einem Solarpanelwinkel  $\alpha_{SP}$  von 90° sind in Abb. 2.5 dargestellt. Um die hohen Frequenzen berechnen zu können, waren kleinere Modifikationen am Modell des S/C notwendig.

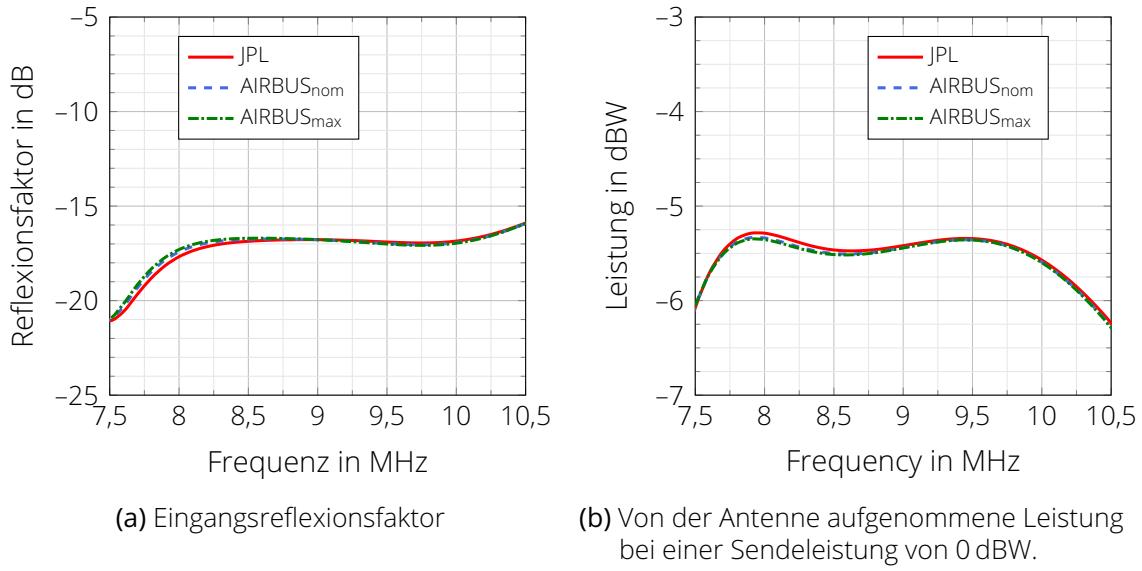


Abbildung 2.3: Auswirkung unterschiedlicher Kabellängen auf die Performance der Antenne mit Anpassnetzwerk.

### 2.1.4 Analyse verschiedener Entwürfe des Anpassnetzwerks und dessen Einfluss auf die Performance

Die Verantwortung für die Entwicklung des Anpassnetzwerk (APN) liegt beim JPL. Der Lehrstuhl für HF analysierte die verschiedenen Entwürfe vom JPL hinsichtlich der Performance in Kombination mit dem RIME-Dipol. Wichtige Parameter sind hier die an den Antennenports zur Verfügung stehende Leistung und die Stabilität der Phase über den Frequenzbereich. Idealerweise muss der Phasenunterschied zwischen beiden Antennenports  $180^\circ$  betragen. Durch die Verwendung von reaktiven Bauelementen im Anpassnetzwerk erfolgt allerdings eine Beeinflussung der Amplituden- und Phasenwerte. Eine zu starke Abweichung beider Größen führt zu einer ungewollten Neigung der Richtcharakteristik und damit zur Verringerung des Gewinns in Nadirrichtung.

### 2.1.5 Toleranzanalyse hinsichtlich eines Ungleichgewichts bei Amplitude und Phase

Im Idealfall müssen innerhalb des kompletten Frequenzbereichs die Amplituden an beiden Ports der Antenne gleich groß sein und die Phasendifferenz zwischen den Ports konstant  $180^\circ$  betragen. In der Realität ist dies nur näherungsweise möglich,

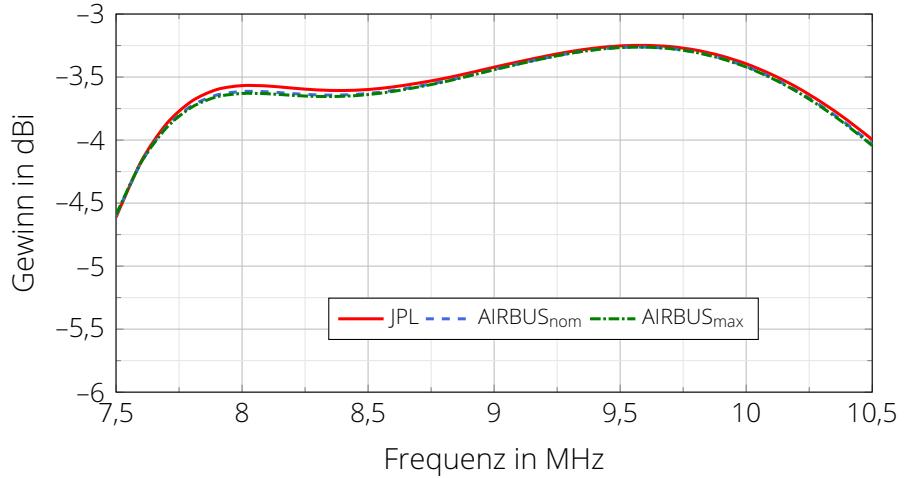


Abbildung 2.4: Gewinn in Nadirrichtung mit Anpassnetzwerk.

weshalb der Gewinn in Nadirrichtung sinkt. Aus diesem Grund wurde eine Toleranzanalyse erstellt, auf deren Grundlage das JPL abschätzen kann, mit welchem maximalen Verlusten beim Gewinn in Nadirrichtung gerechnet werden muss, wenn eine bestimmte Abweichung in Betrag und Phase bei der Amplitude auftritt. Das in Abb. 2.6 dargestellte Balkendiagramm zeigt die maximal auftretenden Verluste beim Nadirgewinn für verschiedene Abweichungen bei Amplitude und Phase. Die Ergebnisse ermöglichen dem JPL die Optimierung des Anpassnetzwerkes in Hinblick auf den Eingangsreflexionsfaktor und damit eine Reduktion der vom PA verursachten Ripple.

### 2.1.6 Analyse der abgewinkelten Konfiguration des Speiseports

Aufgrund von Problemen bei der Zuführung des Koaxialkabels zum Speiseport wurde das Design der Speisestelle von STI überarbeitet. Das neue Design wurde mittels Simulationen auf seine Eignung getestet und die Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Antennensystems analysiert. Die Untersuchungen zeigen, dass die Unterschiede hinsichtlich der Performance geringfügig sind und das neue Design aus elektrischer Sicht bedenkenlos verwendet werden kann. Das ist sowohl am Gesamtwiderstand in Abb. 2.7 als auch beim absoluten Gewinn mit Anpassnetzwerk in Abb. 2.8 zu erkennen.

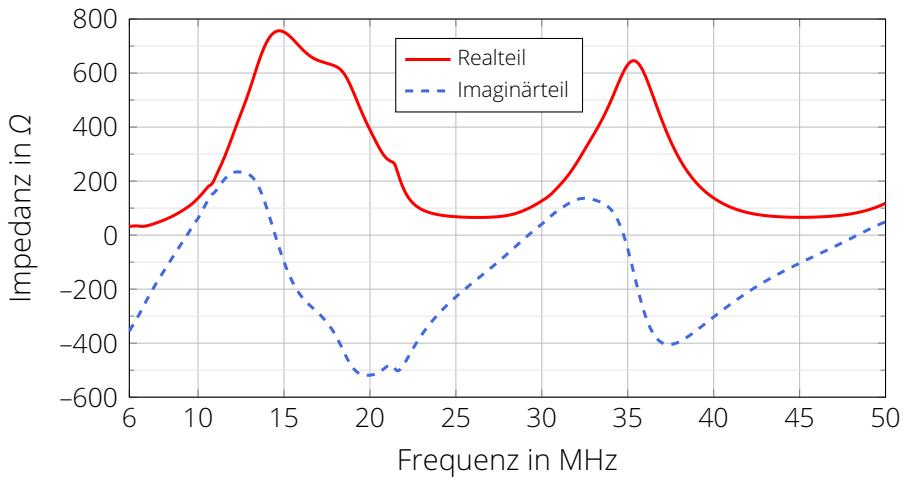


Abbildung 2.5: Resistanz und Reaktanz des RIME-Dipols bis 50 MHz, um den Einfluss der zweiten und dritten Harmonischen auf die von RIME erzeugten elektromagnetischen Störungen zu untersuchen.

### 2.1.7 Untersuchung der Auswirkung einer Graphenbeschichtung auf der Antenne

Um die Antenne vor statischer Aufladung zu schützen, ist diese mit einer  $50 \mu\text{m}$  dicken Graphenschicht überzogen. Aufgrund dieser verlustbehafteten Beschichtung war es notwendig, die Auswirkung auf den Antennengewinn zu untersuchen. In den Simulationen wurde für die Leitfähigkeit ein Wert von  $1 \text{ mS m}^{-1}$  angenommen. Die Analysen haben gezeigt, dass die Beschichtung nur einen geringen Einfluss auf die Antennenperformance hat und die wissenschaftlichen Arbeitsziele nicht gefährdet werden. Dies wird beispielhaft in Abb. 2.9 anhand der Antenneneffizienz und des Gewinns in Nadirrichtung gezeigt.

### 2.1.8 Python-Code zur schnellen Analyse der Performance des Anpassnetzwerkes

Für die Optimierung und den Test des vom JPL entwickelten Anpassnetzwerkes war es notwendig die Möglichkeit zu haben, dieses mit der Antenne in unterschiedlichen Konfigurationen schnell zu testen. Aus diesem Grund wurde ein auf Python und der Signalflusstheorie basierendes Tool entwickelt, das aus den S-Parametern der unterschiedlichen Komponenten das Gesamtverhalten des Antennensystems berechnet. Das Blockschaltbild des Gesamtsystems ist in Abb. 2.10 dargestellt. Somit lassen sich wichtige Kenngrößen, wie die insgesamt an die Antenne gelieferte Leistung, Betrag und Phase der Spannungen sowie die Unterschiede bei der Leistung und der Phase

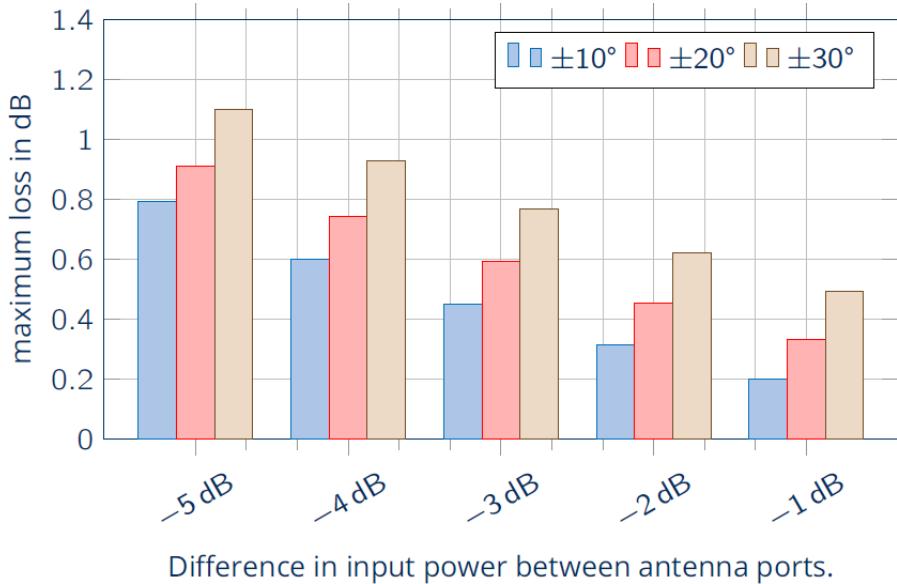


Abbildung 2.6: Maximaler Verlust beim Gewinn in Nadirrichtung, wenn ein bestimmtes Ungleichgewicht bei der Amplitude und der Phase, in Bezug auf die Nominalwerte, zwischen den beiden Antennenports vorliegt.

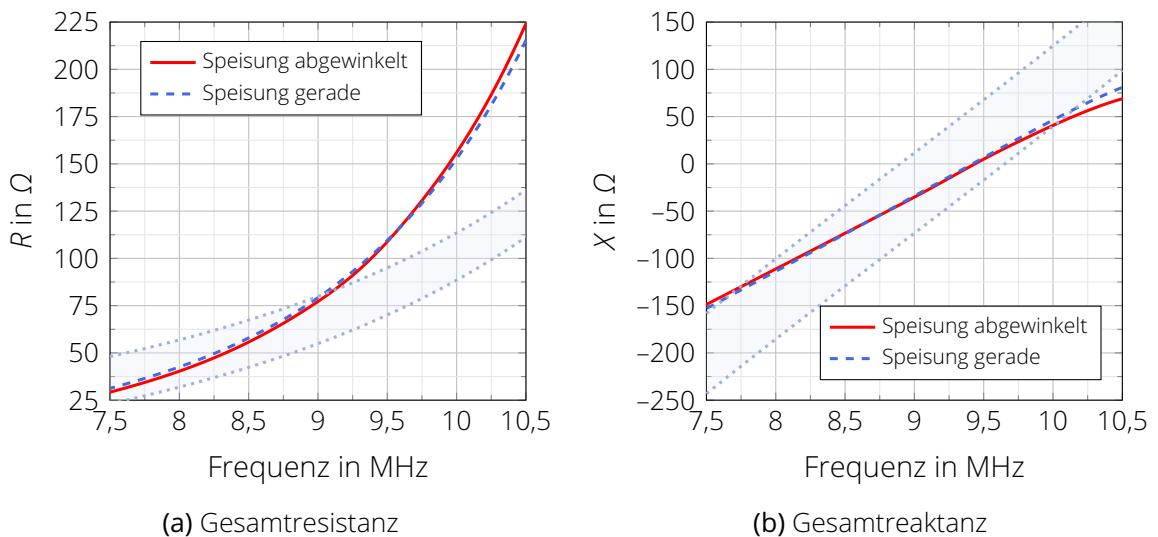


Abbildung 2.7: Vergleich der Eingangsimpedanz für verschiedene Konfigurationen der Speisestelle und einen Solarpanelwinkel von  $90^\circ$ .

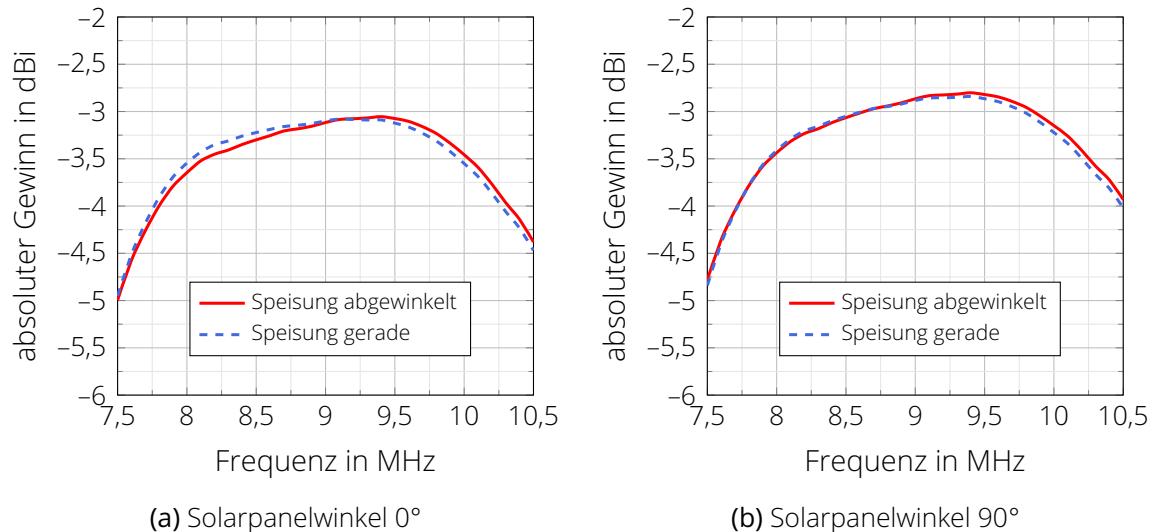


Abbildung 2.8: Absoluter Gewinn der Antenne in Nadirrichtung mit Anpassnetzwerk und Kabeln.

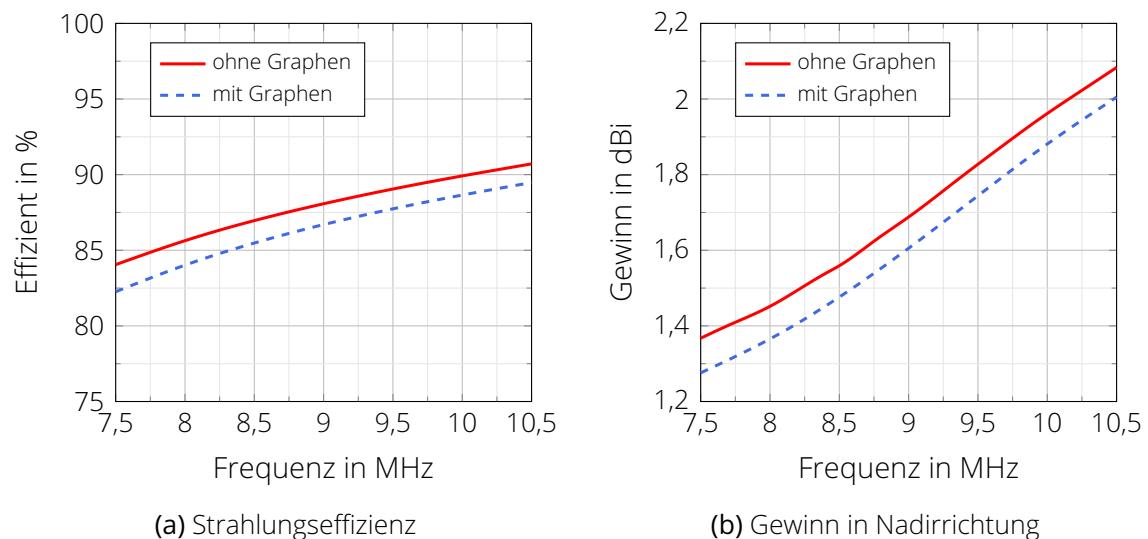


Abbildung 2.9: Auswirkung der Graphenbeschichtung auf die Antenneneffizienz und den Gewinn in Nadirrichtung für einen Solarpanelwinkel von  $90^\circ$ .

an den beiden Antenneneingängen analysieren. Des Weiteren ermöglicht das Tool die Berechnung des System Gain, d.h. des Antennengewinns unter Berücksichtigung aller Verluste innerhalb des Antennensystems. Dies ist insbesondere für die Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Untergrundradars in Hinblick auf die Eindringtiefe relevant, um das Erreichen der wissenschaftlichen Arbeitsziele zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde das entwickelte Tool dem JPL für die interne Optimierung des Anpassnetzwerkes zur Verfügung gestellt.

### 2.1.9 Antennenleitfähigkeit: worst-case und best-case Analyse

Die beiden Antennenarme von RIME bestehen aus leitfähigem Karbonfasermetall (CFRP), dessen Leitfähigkeit ein temperaturabhängiges Verhalten aufweist. Basierend auf Messungen und Literaturangaben zur Leitfähigkeit von CFRP kann davon ausgegangen werden, dass die Leitfähigkeit des Materials während des Einsatzes im Jupitersystem immer größer als  $13\,900\,S\,m^{-1}$  und kleiner als  $25\,000\,S\,m^{-1}$  sein wird. Aus diesem Grund wurde für diese beiden Werte eine komplette Analyse der Leistungsfähigkeit des Antennensystems durchgeführt. Abb. 2.11 zeigt exemplarisch den Eingangsreflexionsfaktor und den Gewinn in Nadirrichtung für unterschiedliche Stellungen der Solarpanel. Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede im Bereich von maximal 0,2 dB liegen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass keine negativen Auswirkungen durch Impedanzschwankungen in Hinsicht auf das Verhalten des Anpassnetzwerkes auftreten.

### 2.1.10 Charakterisierung der dummy loads

Zur Nachbildung des Verhaltens des Antennensystems auf der Erde wurden vom JPL dummy loads entworfen. Diese bilden die Eingangsimpedanz, die Verkopplung der Antennenarme, die Spannung nach Betrag und Phase sowie die Verluste der Antenne nach. Den prinzipiellen Aufbau zeigt Abb. 2.12. Hier leistete der Lehrstuhl HF

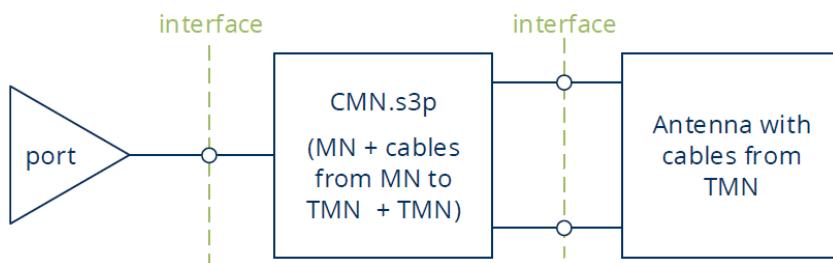
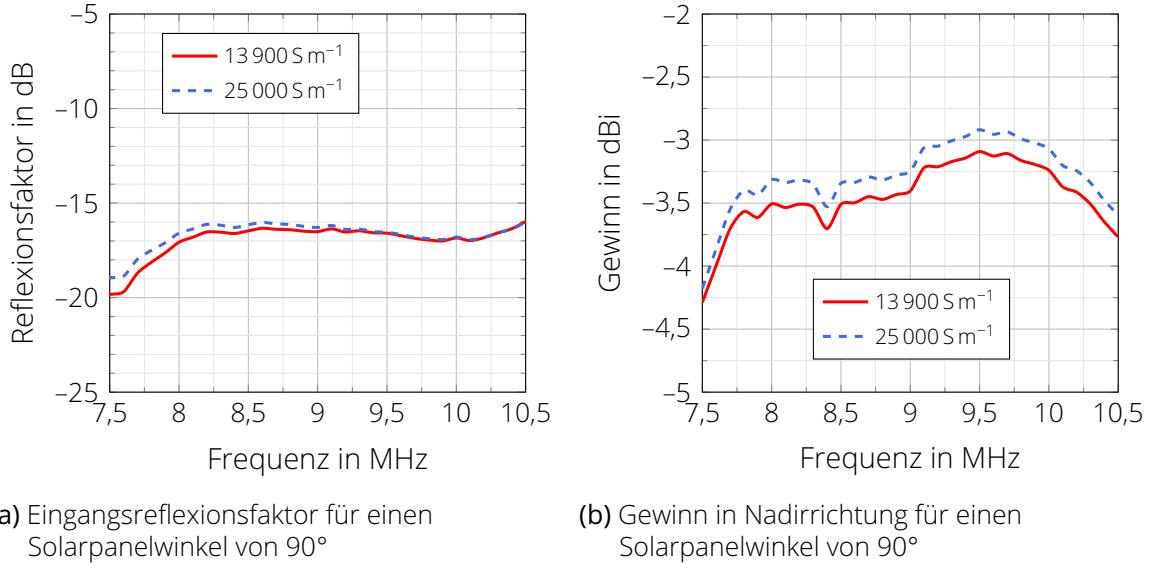


Abbildung 2.10: Blockschaltbild der einzelnen S-Parameterblöcke mit Anpassnetzwerk und Antenne.



(a) Eingangsreflexionsfaktor für einen Solarpanelwinkel von 90°

(b) Gewinn in Nadirrichtung für einen Solarpanelwinkel von 90°

Abbildung 2.11: Vergleich des Gewinns in Nadirrichtung für unterschiedliche Leitfähigkeiten und Solarpanelwinkel.

Unterstützung beim Design und bei der Überprüfung des Verhaltens der entworfenen dummy loads.

### 2.1.11 De-embedding des Antennensimulators

Das in Abb. 2.13 dargestellte Blockschaltbild zeigt den kompletten Aufbau zur Nachbildung des Verhaltens des Antennensystems. Der TX-Block repräsentiert dabei den Power Amplifier (PA), dessen Ausgangssignal von der nachfolgenden Last abhängt. Aus diesem Grund muss das Verhalten dieser Komponente unter realen Lastbedingungen bestimmt werden, d.h. die Messung kann nur am Ausgang des Combiners erfolgen ( $V_{cmb}$ ). Demzufolge ist keine separate Messung des PAs möglich und

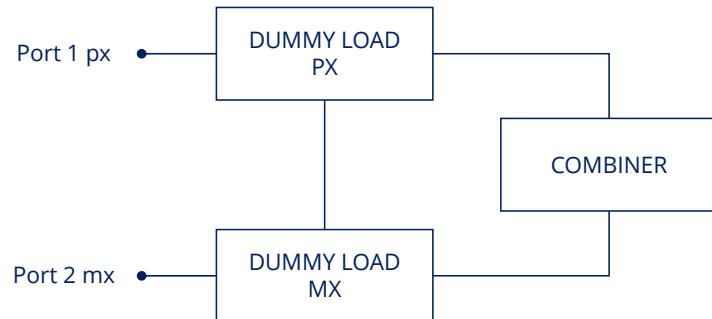


Abbildung 2.12: Blockschaltbild des Designs der dummy loads mit Combiner.

das Verhalten kann nur durch ein de-embedding der restlichen Systemkomponenten ermittelt werden. Dazu wird die Voltage Transfer Function (VTF) des Systems, wie in Abb. 2.14b dargestellt, berechnet. Das um die VTF bereinigte Signal zeigt die Abb. 2.14c. Dieses Vorgehen ist notwendig, weil das vom PA erzeugt Signal als Input für die HFSS-Simulationen dient. Nur so lässt sich das Verhalten des Antennensystems mit realer Quelle nachbilden.

Die gemessene Spannung am Ausgang des Combiners zeigt Abb. 2.14a. In Abb. 2.14b ist die berechnete Spannungsübertragungsfunktion  $H_{AS}(f)$  des Antennensimulators dargestellt. Das Ausgangssignal am PA nach dem die restlichen Komponenten herausgerechnet wurden, ist in Abb. 2.14c dargestellt.

### 2.1.12 Berechnung der Referenzfunktion

Das Ausgangssignal am Antennensimulator und das des realen Antennensystems sind nicht identisch, d. h. es gibt frequenzabhängige Unterschiede in Betrag und Phase. Damit am Ausgang des Antennensimulators auf der Erde das gleiche frequenzabhängige Signal erzeugt wird, wie beim realen Antennensystem, wird eine entsprechende Korrekturfunktion benötigt. Die Referenzfunktion wird am Lehrstuhl für HF erzeugt und in Zusammenarbeit mit dem JPL die darauf basierende Korrekturfunktion berechnet. Die Arbeiten an der Referenzfunktion sind noch nicht komplett abgeschlossen und werden in der aktuellen Projektphase weitergeführt.

### 2.1.13 Einfluss des Antennensimulators auf das Chirp-Signal

Die Arbeiten haben die Charakterisierung des kompletten Sende- und Empfangssystems zum Ziel. Dafür werden sowohl der Sende- als auch der Empfangszweig nachgebildet und deren Auswirkung auf das Chirp-Signal analysiert. In Abb. 2.15 ist die

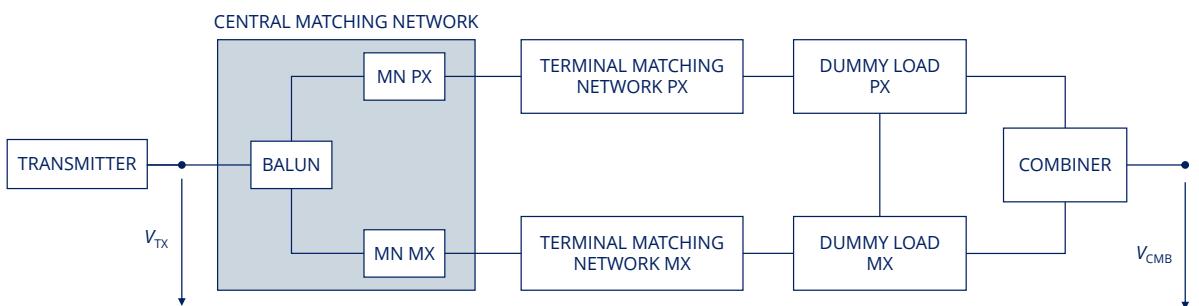


Abbildung 2.13: Blockschaltbild des kompletten Antennensimulators mit CMN, TMN und den dummy loads.

## 2 Eingehende Darstellung

---

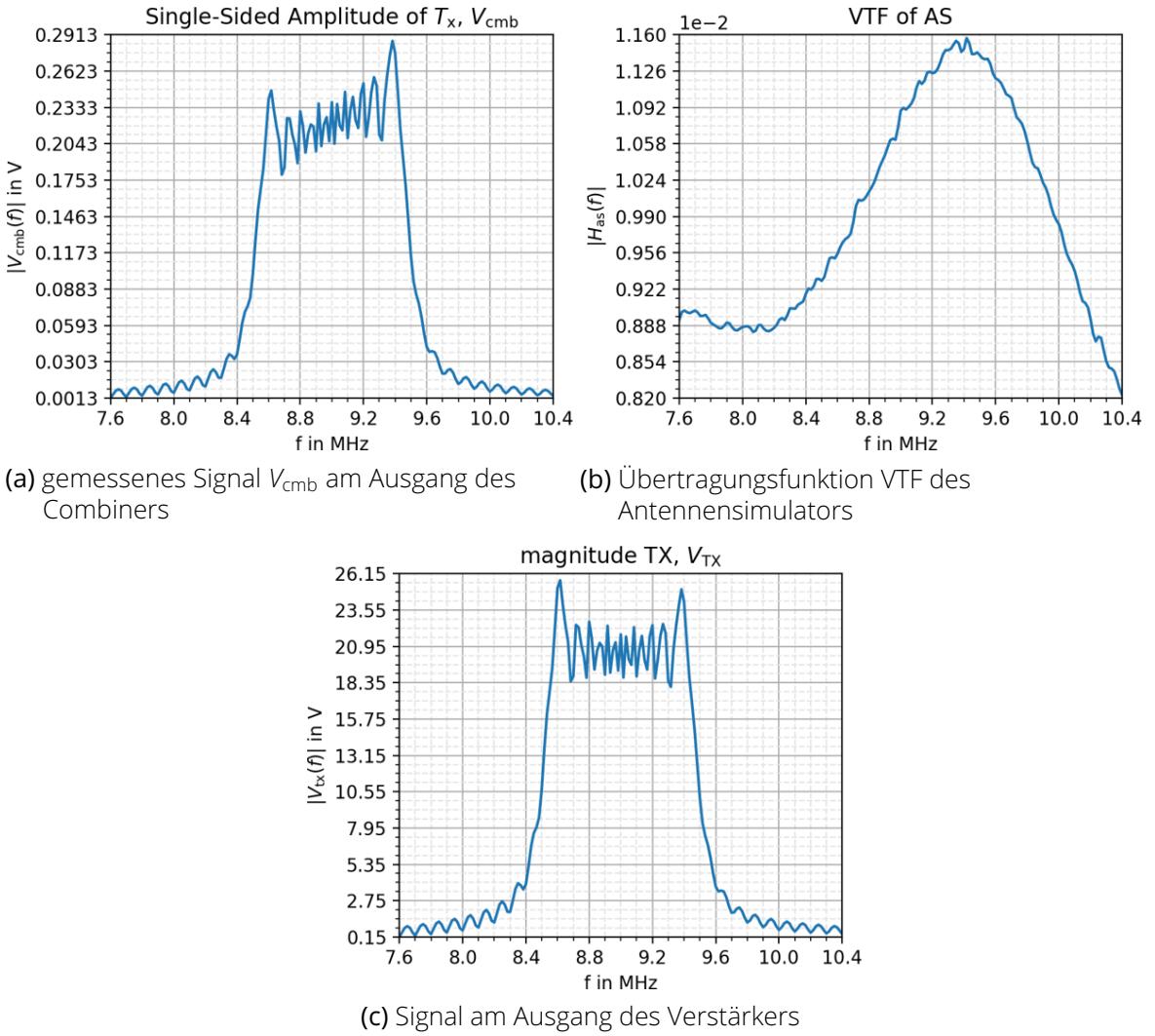


Abbildung 2.14: Übertragungsverhalten für eine Pulsdauer von  $50 \mu\text{s}$  und eine Bandbreite von  $1 \text{ MHz}$

Übersicht des untersuchten Gesamtsystems zu sehen. Der obere, blau gekennzeichnete Teil stellt den Sendepfad dar. Dort sind das Central Matching Network (CMN), das Terminal Matching Network (TMN) und die dummy loads zu erkennen.

Die dummy loads und der Combiner bilden das Verhalten der Antenne nach und werden als Antennensimulator bezeichnet. Das frequenzabhängige Verhalten vom Antenna Simulator (AS) wurde für unterschiedliche Konfigurationen messtechnisch bei der ESA bestimmt. Dass gleiche gilt für das CMN und das TMN. Die Messdaten werden in das dafür erstellte Simulationstool eingebunden. Das Ausgangssignal des Combiners wird sofort wieder in den orangefarben gekennzeichneten Empfangspfad eingespeist. Es durchläuft somit die selbe Struktur in der umgekehrten Richtung. Damit wird der Einfluss der Elektronik beim Senden und Empfangen bestimmt

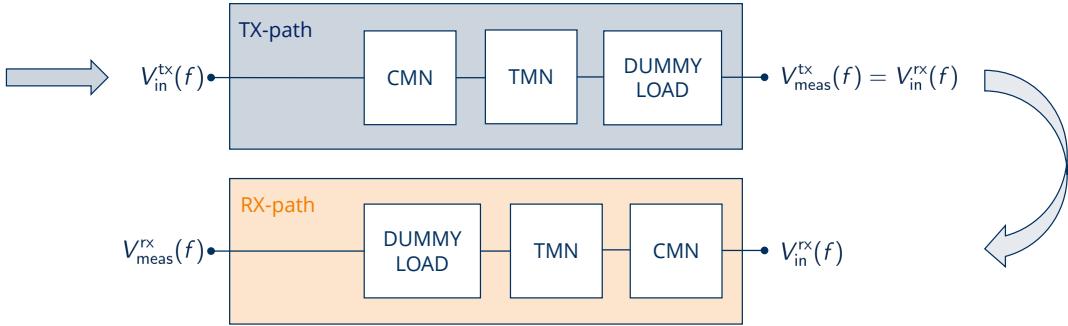


Abbildung 2.15: Schemata für den Sende- und Empfangspfad.

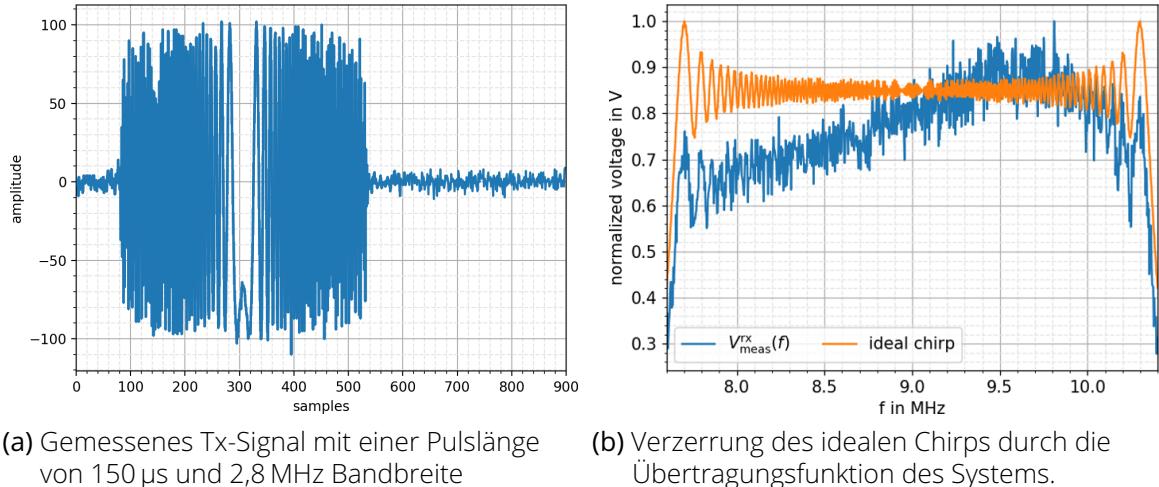
und es können Verzerrungen des gesendeten Chirp-Signals in Bezug auf den idealen Chirp berechnet werden. Der Einfluss des Switchs wird als vernachlässigbar angenommen. Des Weiteren wird die Verzerrung beim realen Antennensystem mittels Simulation ermittelt. Durch den Vergleich der Daten kann dann eine Kalibrierung des Antennensimulators erfolgen, wodurch eine Nachbildung der Flugkonfiguration auf der Erde möglich ist. Der gemessene und gesendete Chirp, ohne den Einfluss der Elektronik, ist in einer ausgewählten Konfiguration in Abb. 2.16a zu sehen. Hier beträgt die Bandbreite 2,8 MHz und die Pulslänge 150  $\mu$ s. Für das Chirp-Signal gibt es darüber hinaus Messdaten mit einer Bandbreite von 1 MHz und verschiedene Pulslängen im Bereich von 50  $\mu$ s bis 250  $\mu$ s. Die durchgeführten Arbeiten sind essentiell, um das Erreichen der wissenschaftlichen Arbeitsziele sicherzustellen. Nur so kann das Verhalten des Antennensystems während der Operationsphase auf der Erde nachgebildet werden kann.

Die Diagramme in Abb. 2.17 zeigen die nichtlineare Verzerrungen der Phase im Sende- und Empfangspfad im Vergleich zum idealen Chirp-Signal. Wie anhand der Diagramme zu erkennen ist, liegen die Abweichungen im Bereich von  $-20^\circ$  bis  $12^\circ$ .

### 2.1.14 Systemsimulator

Bei den Arbeiten am Systemsimulator erfolgt die Einbindung aller verfügbaren Daten, d. h. von CMN, TMN, den dummy loads und der Strahlungscharakteristik. In Abb. 2.18 ist beispielsweise die Strahlungscharakteristik des S/Cs bei einer Frequenz von 9 MHz zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Verkopplung mit dem S/C und den anderen Experimenten eine frequenzabhängige Verformung der idealen Strahlungscharakteristik eines Dipols bewirkt.

Der Systemsimulator berücksichtigt die Ausbreitungseigenschaften und die Streuung des Signals sowohl an der Oberfläche als auch im Untergrund. Damit lässt sich das Verhalten des Radarsystems vollumfänglich nachbilden. Des Weiteren wird eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Systems ermöglicht, weil das reale System



(a) Gemessenes Tx-Signal mit einer Pulslänge von  $150\ \mu\text{s}$  und  $2,8\ \text{MHz}$  Bandbreite

(b) Verzerrung des idealen Chirps durch die Übertragungsfunktion des Systems.

Abbildung 2.16: Gemessenes TX-Signal für eine ausgewählte Konfiguration und die Verzerrung des idealen Chirp-Signals durch das System.

das Chirp-Signal sowohl in der Amplitude als auch in der Phase verzerrt, wodurch beispielsweise die Eindringtiefe oder das Auflösungsvermögen negativ beeinflusst werden können.

### 2.1.15 Überprüfung der STI-Performance-Tests

Im Zuge von Tests bei STI hinsichtlich der Antennenperformance des Engineering Qualification Model (EQM) wurden größere Abweichungen im Vergleich zu den Referenzwerten aus der Simulation festgestellt. Aus diesem Grund wurde eine nähere Untersuchung von Seiten der ESA initiiert, um eventuelle Probleme durch eine Fehlanpassung frühzeitig zu erkennen und zu eliminieren. Die durchgeführten Analysen hatten zum Ergebnis, dass der Hauptgrund für die Abweichungen darin liegt, dass der gewählte Raum für diese Art von Messungen ungeeignet ist. Der Reinraum ist in Bezug auf die Wellenlänge deutlich zu klein, beinhaltet mehrere metallische Objekte und die Wände sind nicht mit Absorbern versehen, um Reflexionen zu minimieren. Die Messergebnisse sind somit ungeeignet, um einen Vergleich mit den Referenzwerten durchzuführen. Damit eventuelle Unsicherheiten ausgeschlossen werden können und die Impedanz messtechnisch bestätigt wird, wurde ein neuer Feldtest bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig von der ESA anberaumt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Abschnitt 2.1.16 aufgeführt.

## 2 Eingehende Darstellung

---

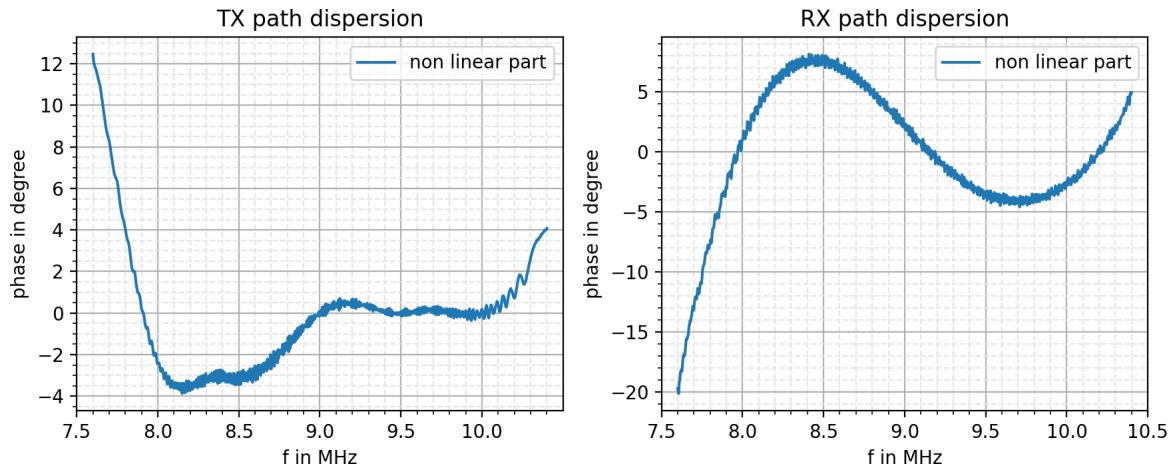


Abbildung 2.17: Berechnete nichtlineare Verzerrung der Phase im Tx- und Rx-Pfad.

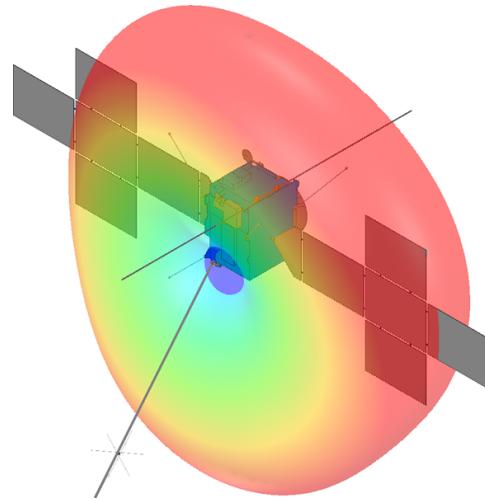


Abbildung 2.18: JUICE mit Antennencharakteristik bei 9 MHz.

### 2.1.16 Feldtests bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig

Bei RIME wurde im letzten Schritt die Impedanz der finalen Antenne überprüft, damit die Funktionsfähigkeit in Kombination mit dem Anpassnetzwerk gewährleistet ist. Aufgrund der niedrigen Frequenz ist eine Messung in einer Absorberkammer ausgeschlossen. Deshalb wurde eine mehrtägige Freifeldmessung bei der PTB in Braunschweig durchgeführt. Dazu wurde, wie in Abb. 2.20 zu sehen, ein RIME-Antennenarm als Monopol auf einer  $50\text{ m} \times 60\text{ m}$  großen leitfähigen Grundplatte aufgebaut. Der Monopol wurde in verschiedenen Konfigurationen gemessen, d. h. mit unterschiedlichen Antennenhöhen, mit und ohne Koaxialkabel sowie mit verschiedenen Varianten der Erdung. Zusätzlich wurde als Referenz ein metallischer Dipol verwendet, um



Abbildung 2.19: Reinraum bei STI mit EQM der Antenne auf Metallgestell gelagert.

Unsicherheiten hinsichtlich der Leitfähigkeit der RIME-Antenne auszuschließen. Der Aufbau wurde im HF-Simulationsprogramm nachgebildet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation in Abb. 2.21 zeigt eine gute Übereinstimmung. Mit dieser Messung wurde nachgewiesen, dass der RIME-Dipol und das APN innerhalb der Spezifikationen zusammenarbeiten und keine Verluste aufgrund einer schlechten Anpassung zu erwarten sind.

Für die Erstellung des Testreports in Zusammenarbeit mit STI wurden zusätzlich umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich parasitärer Kapazitäten und Induktivitäten durchgeführt, die die vorhandenen Abweichungen zwischen Messung und Simulation erklären. In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Versionen der Erdung analysiert, die bereits während der Messung Verwendung fanden. Das beinhaltet unterschiedliche Befestigungspunkte für die Erdung sowie unterschiedliche Kabellängen. Darüber hinaus wurde die Auswirkung des Silberschildes, welcher Multipaction verhindert, untersucht. Aufgrund von Toleranzen treten unterschiedliche Längen der Überlappung und unterschiedliche Abstände zur Speisestelle auf.

### 2.1.17 Messung des skalierten S/C-Modells im Maßstab 1:18

Zur Evaluierung der Simulationsergebnisse wurde an der TU-Dresden in der vorhergehenden Projektphase ein stark vereinfachtes, skaliertes Modell im Maßstab 1:18 gebaut. Nach der erfolgreichen Messung dieses Modells wurde in der aktuellen Projektphase ein erweitertes, detailliertes Modell an der TUD entworfen und gefertigt. Das detaillierte Modell enthält im Gegensatz zum einfachen Modell auch andere Experimente, die die Strahlungscharakteristik des RIME-Dipols aufgrund ihrer Position

## 2 Eingehende Darstellung

---



Abbildung 2.20: Bestimmung der Eingangsimpedanz eines Antennenarms von RIME auf dem Messgelände des PTBs in Braunschweig.

und Geometrie verzerren könnten. Zu diesen gehören zum Beispiel das RWI, der MAGBoom und die Langmuir-Probes. Darüber hinaus wurden die Erfahrungen beim Bau des ersten Modell genutzt, um Verbesserungen hinsichtlich der Stabilität und der Integration in die Messkammer zu berücksichtigen. Das gefertigte Modell ist ein Abb. 2.22 zu sehen.

Das Modell besteht komplett aus Metall, d. h. es wurden keine Karbonfasermaterialien verwendet. Die Solarpanelelemente sind durch die Widerstände  $R_{SC}$  und  $R_{SP}$  isoliert, um die Rückwirkung auf die Strahlungscharakteristik zu vermindern. Die Position der Widerstände ist aus Abb. 2.23 ersichtlich.

Der gewählte Skalierungsfaktor resultiert aus der niedrigsten Frequenz, die in der zur Verfügung stehenden Messkammer am European Space Research and Technology Centre (ESTEC) der ESA in Noordwijk gemessen werden kann. Die untere Frequenzgrenze des relexionsarmen Raums liegt dort theoretisch bei 400 MHz. Basierend auf vorherigen Messungen bei niedrigen Frequenzen und den daraus resultierenden Erfahrungen wurde eine Frequenz von 162 MHz für die modellskalierten Messungen gewählt. Dieser Wert und der daraus resultierende Skalierungsfaktor sind ein Kompromiss aus der zu erwartenden Messgenauigkeit und den mechanischen Möglichkeiten bei der Nachbildung des S/Cs. In Abb. 2.24 ist das skalierte Modell im reflexionsarmen Raum des ESTEC während der Messung zu sehen.

Die Diagramme in Abb. 2.25 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation. Besonders in Nadirrichtung, d. h. in Richtung des Untergrunds, weisen die gemessenen Werte eine vernachlässigbare Abweichung im Vergleich zu den Simulationen auf. Die Abweichungen in den anderen Richtungen resultieren aus der

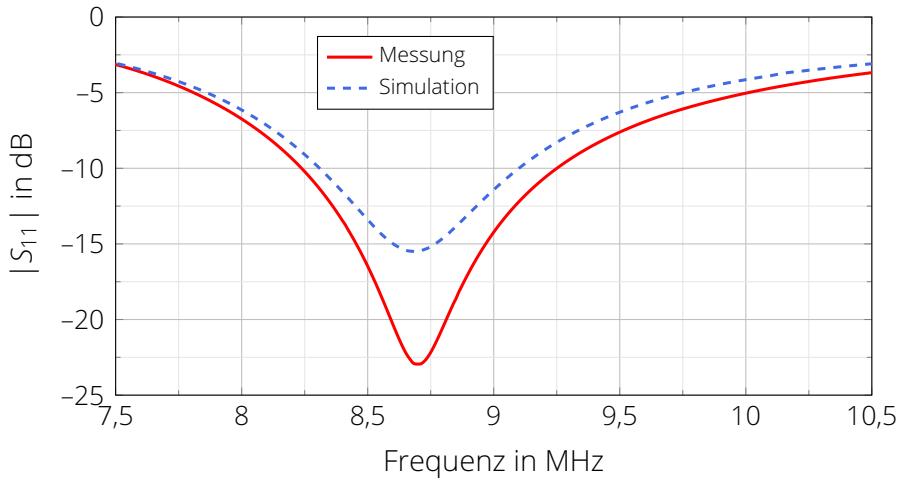


Abbildung 2.21: Eingangsreflexionsfaktor - Messung vs. Simulation

Befestigung des Modells auf dem Messplatz und aus Reflexionen aus der Umgebung aufgrund der niedrigen Frequenz.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Dienstreisemittel stellten den Hauptanteil der Projektmittel dar. Diese wurden dazu verwendet die Ergebnisse bei entsprechenden Fachkonferenzen zu veröffentlichen sowie Besprechungen bei Partnern und Feldtests durchzuführen. Des Weiteren wurden Mittel für die Beschaffung einer Softwarelizenz für Optenni Lab verwendet. Diese Software unterstützte den Entwurf der Anpassnetzwerke.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei JUICE handelt es sich um eine Mission für die ein neues Raumfahrzeug gebaut wurde. Sowohl das Design des Raumfahrzeugs selbst als auch die Anordnung der Experimente hat sich während der Projektlaufzeit noch verändert. Darüber hinaus kommt bei RIME ein völlig neuartiges Antennensystem zum Einsatz. Aus den genannten Gründen stellen die durchgeführten Untersuchungen sicher, dass die spezifizierten wissenschaftlichen Arbeitszeile des Radarsystems erreicht werden.

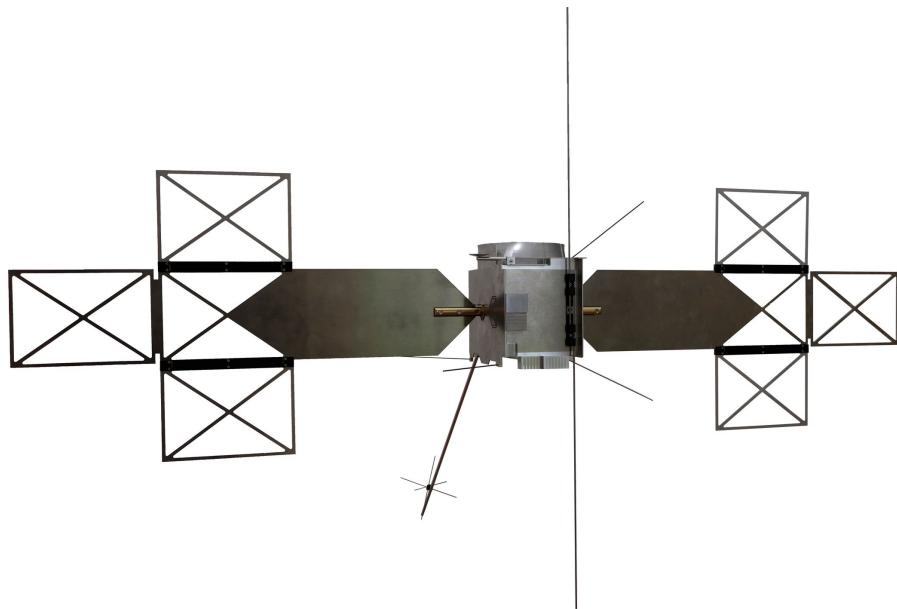


Abbildung 2.22: Für die modellskalierten Messungen am Lehrstuhl HF entworfenes Modell des S/Cs im Maßstab 1:18.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind direkt in das Design des Antennensystems und des S/C eingeflossen. Beispielsweise wird durch die Verwendung von Widerständen in den Solarpanelen die Leistungsfähigkeit des Radarsystems signifikant gesteigert. Des Weiteren stellen die durchgeführten Untersuchungen das Erreichen der spezifizierten wissenschaftlichen Arbeitsziele des Experiments RIME sicher. Die Erkenntnisse der Analysen werden darüber hinaus für nachfolgende Missionen eingesetzt.

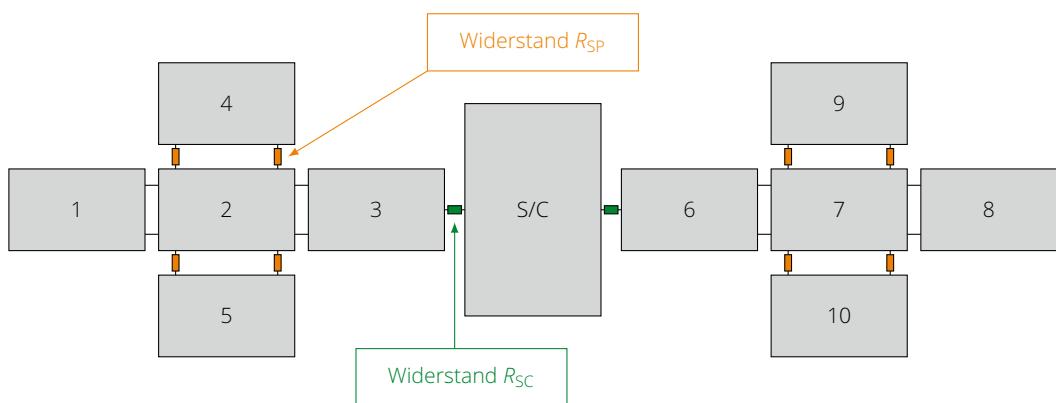


Abbildung 2.23: S/C mit verwendeter Widerstandskonfiguration.

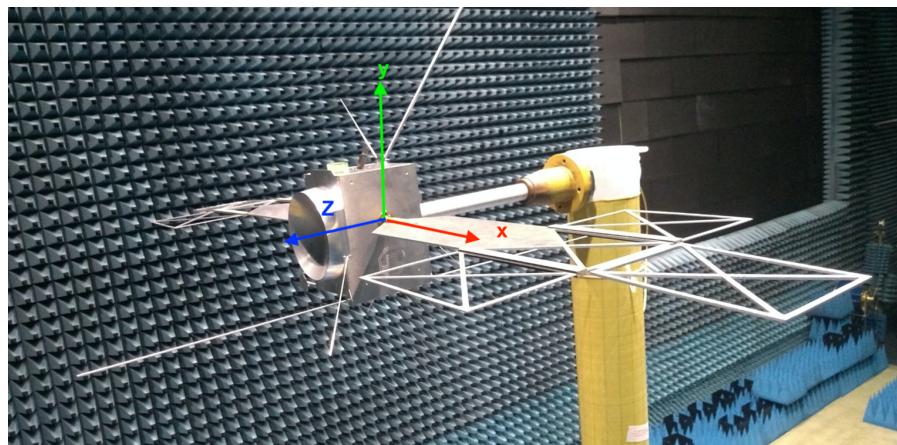


Abbildung 2.24: Foto des detaillierten, skalierten Modells im Maßstab 1:18 mit einem Solarpanelwinkel von  $0^\circ$  in der HERTZ-Messkammer des ESTEC.

## 2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Weitere Fortschritte auf dem vorgestellten Gebiet bei anderen Stellen sind nicht bekannt.

## 2.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses

- R. Hahnel, D. Plettemeier und L. Bruzzone, *Impact of Magnetometer Boom with Radio Wave Experiment on RIME Performance aboard JUICE*, 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Sydney, Australia, 2022, pp. 339-340.
- R. Hahnel und D. Plettemeier, *Evaluation of the radiation pattern and the input impedance for RIME dipole aboard JUICE*, EGU 2019, Wien, Österreich, 2019.

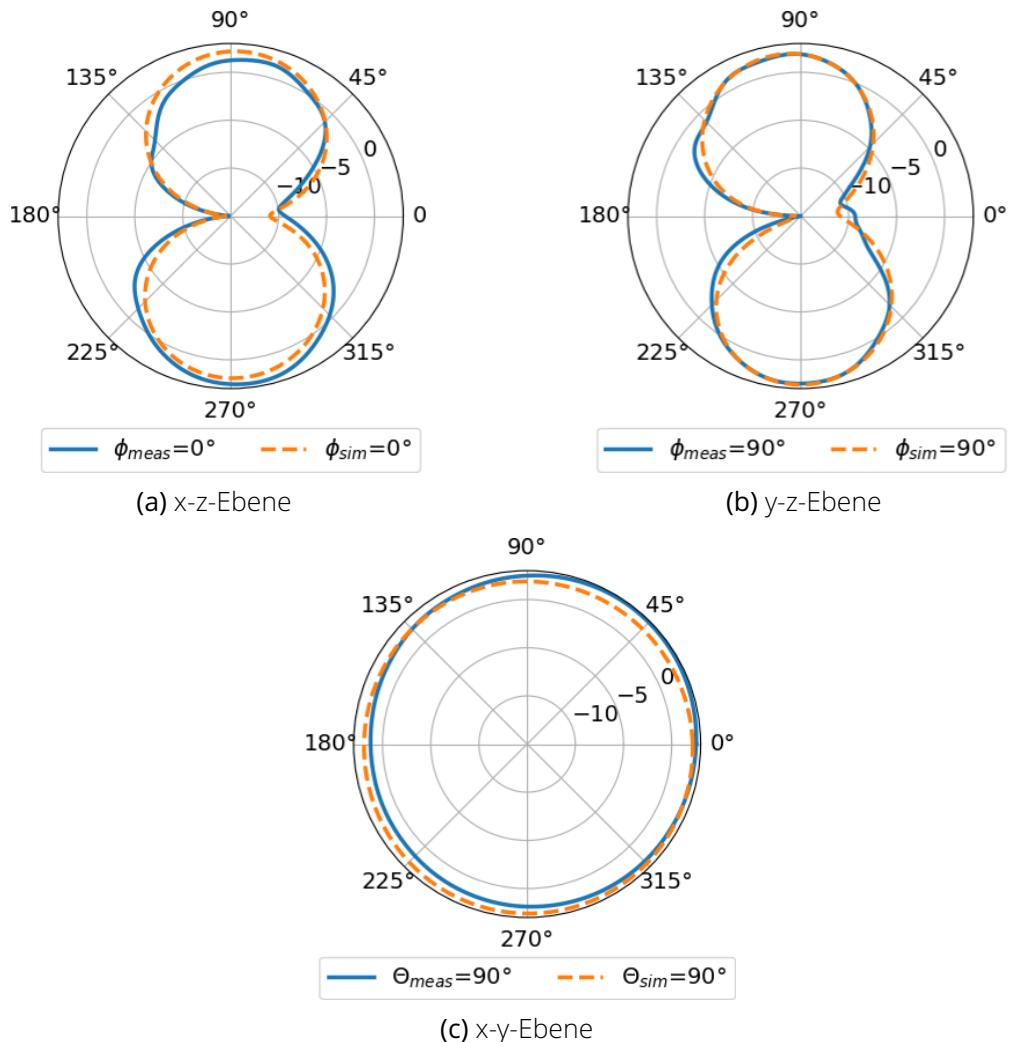


Abbildung 2.25: Vergleich des absoluten Gewinns zwischen Messung und Simulation für einen Solarpanelwinkel von  $90^\circ$ . In diesem Fall steht die Antennenachse senkrecht auf der von den Solarpanel aufgespannten Ebene

# Literatur

- [Jor+09] JORDAN, R.; PICARDI, G.; PLAUT, J.; WHEELER, K.; KIRCHNER, D.; SAFAEINI-  
LI, A.; JOHNSON, W.; SEU, R.; CALABRESE, D.; ZAMPOLINI, E.; CICCHETTI, A.;  
HUFF, R.; GURNETT, D.; IVANOV, A.; KOFMAN, W.; OROSEI, R.; THOMPSON,  
T.; EDENHOFER, P.; BOMBACI, O. The Mars express MARSIS sounder in-  
strument. *Planetary and Space Science*. 2009, Jg. 57, Nr. 14, S. 1975–1986.  
ISSN 0032-0633.
- [Seu+04] SEU, R.; BICCARO, D.; OROSEI, R.; LORENZONI, L.V.; PHILLIPS, R.J.; MARIN-  
ANGELI, L.; PICARDI, G.; MASDEA, A.; ZAMPOLINI, E. SHARAD: The MRO  
2005 shallow radar. *Planetary and Space Science*. 2004, Jg. 52, Nr. 1, S. 157–  
166. ISSN 0032-0633.
- [Spa19] SPACETECH. *JUICE RIME Antenna* [online]. 2019. [besucht am 2019-06-24].  
Abger. unter: <https://spacetech-i.com/products/satellite-equipment/juice-rime-antenna>.

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report	
3a. Report Title		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))		5. End of Project
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date
		7. Form of Publication
8. Performing Organization(s) (Name, Address)		9. Originator's Report No.
		10. Reference No.
		11a. No. of Pages Report
		11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)		12. No. of References
<p>Raumfahrtmanagement des            Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.            Königswinterer Str. 522-524            53227 Bonn</p>		14. No. of Tables
		15. No. of Figures
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract		
19. Keywords		
20. Publisher		21. Price