

TRIPLE-FRS

An in-ice forefield reconnaissance system

Schlussbericht der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg

Datum 30.11.2023

Autoren:

Niklas Haberberger, Michael Stelzig, Carmen Kleinert, Martin Vossiek

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik Prof. Dr-Ing. Martin Vossiek	Förderkennzeichen: 50RK2050
Vorhabensbezeichnung: TRIPLE-FRS	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2020-30.06.2023	

1. Einleitung	2
2. Kurzzusammenfassung TRIPLE-FRS	4
2.1. Aufgabenstellung	4
2.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
2.3.1. Aufgabenverteilung	5
2.3.2. Projektverlauf	6
2.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Kollaborationen	9
3. Aufgabenstellung FAU	9
4. Darstellung der Ergebnisse	10
4.1. Entwicklung des Radarsystems	10
4.1.1. Konzeption des Radarsystems	10
4.1.2. Antennen	11
4.1.3. Basisbandmodul	15
4.1.4. Hochfrequenzmodul	16
4.2. Integration	18
4.2.1. Mechanik	18
4.2.2. Elektronik	20
4.2.3. Software	22
4.3. Verifikation/ Feldtests	23
4.3.1. Freifeldmessung Flugplatz Marloffstein	23
4.3.2. Feldtest Langenferner 2021	25
4.3.3. Feldtest Langenferner 2022	29
4.3.4. Feldtest Aletschgletscher 2023	31
5. Verwertung	35

1. Einleitung

In unserem Sonnensystem gibt es unterschiedliche Orte, an denen die Möglichkeit besteht, dass sich extra-terrestrisches Leben entwickelt haben könnte. Ein Beispiel sind die Eismonde der Gasplaneten im äußeren Sonnensystem, wie Europa oder Enceladus [1]. Insbesondere

in den Ozeanen, die sich unter den mächtigen Eiskrusten der Eismonde verbergen, finden sich die nach heutiger astrobiologischer Sicht notwendigen Bedingungen für die Entstehung von Leben: Energie, flüssiges Wasser und komplexe organische, sowie anorganische Moleküle [2]. Aus diesem Grund fokussiert sich die Suche nach extraterrestrischem Leben, als Teil der Weltraumforschung, auf diese Wasservorkommen.

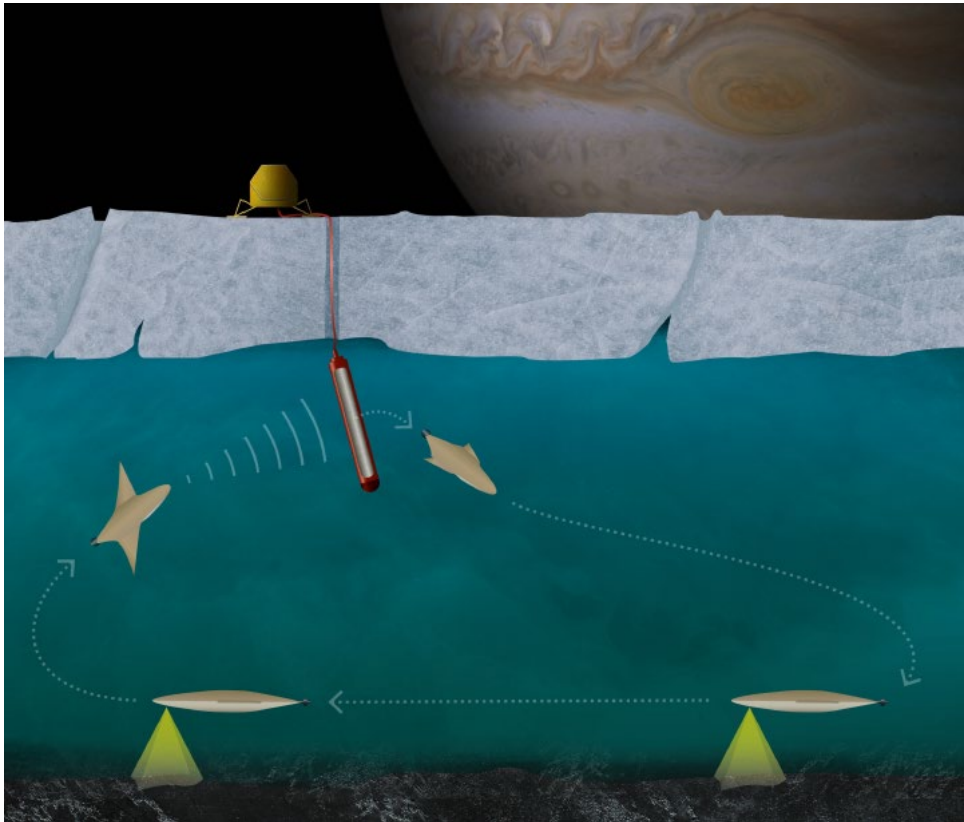


Abbildung 1: Missionskonzept der TRIPLE-Projektlinie mit den drei Bestandteilen Schmelzsonde, autonomes Unterwasserfahrzeug (nanoAUV) und AstroBioLab auf der Suche nach extraterrestrischem Leben auf dem Jupitermond Europa. [credit: MARUM]

In der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR werden Konzepte erarbeitet, um die möglichen habitablen Ozeane zu erreichen und auf Lebensspuren hin untersuchen zu können. Innerhalb der TRIPLE-Projektlinie wird ein Konzept zur Erkundung des Europa-Mondes und dessen subglazialen Ozean entwickelt (siehe Abbildung 1), welches zunächst in einem terrestrischen Analog Szenario in der Antarktis demonstriert werden soll [3]. Eine Schmelzsonde, die ein autonomes Unterwasserfahrzeug (nanoAUV) transportiert, soll sich durch die Eiskruste, bis zum darunter befindlichen Wasserreservoir durchschmelzen, um dort das nanoAUV abzusetzen. Das nanoAUV soll dann das subglaziale Gewässer erkunden und auf Lebensspuren hin untersuchen [4]. Dafür sollen in einem AstroBioLab die vom nanoAUV gesammelten Proben untersucht werden. Spätestens auf dem Eismond Europa wird eine aktive Navigation der Schmelzsonde durch die komplexe und geologisch unterschiedlich beschaffene Eisschicht unumgänglich. Daher muss bereits für das terrestrische Analog Szenario ein Vorfelderkundungssystem für den Schmelzroboter entwickelt und validiert werden. Ziel des Vorhabens ist daher die Entwicklung von Komponenten zur Detektion von Hindernissen in der geplanten Trajektorie eines Schmelzroboters, die Erkennung

wasserführender Gletscherspalten sowie die Identifizierung der Eis-Wasser Grenzschicht beim Übergang zwischen Eispanzer und subglazialen Gewässer.

2. Kurzzusammenfassung TRIPLE-FRS

2.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens TRIPLE-FRS sollte ein hybrides Radar/Sonar-Vorfelderkundungssystem zur Detektion von Hindernissen und Zielobjekten in der Trajektorie der Schmelzsonde entwickelt werden, das in den Kopf eines Schmelzroboters integriert werden kann. Die Wahl zweier komplementärer Sensorkonzepte ermöglicht eine hohe Robustheit und gewährleistet die Funktionalität in verschiedensten Umgebungsbedingungen. Radar kann eine hohe Reichweite erzielen, die durch einen zusätzlichen Hochleistungsimpulsverstärker vergrößert werden kann, wobei es Schwierigkeiten mit beispielsweise wassergefüllten Spalten hat. Das Sonar kann potenziell auch Ziele hinter einer derartigen Spalte detektieren, offenbart aber Schwächen bei schlechter akustischer Ankopplung an das Eis. Weiterhin beinhaltet das Vorfelderkundungssystem ein System zur Bestimmung der Permittivität für die Korrektur der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen. Die Funktionalität der Systeme wurde auf Gletscherfeldtests in den Alpen demonstriert. Die Zuständigkeiten für die Entwicklung der Teilsysteme war wie folgt auf die Projektpartner verteilt:

- FAU Erlangen (Verbundführung): Radarsystem
- BU Wuppertal: Permittivitätssensor
- GloMic GmbH: Hochleistungsimpulsverstärker
- RWTH Aachen: Sonarsystem

2.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

FAU Erlangen

Der Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (LHFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg gehört weltweit zu den führenden Lehrstühlen im Bereich Hochfrequenztechnik. Der Lehrstuhlinhaber Prof. Vossiek arbeitet seit fast 20 Jahren intensiv im Bereich Radar- und Ortungstechnologien. Seine Arbeiten führten zu zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen und >100 erteilten Patenten im Themenfeld. Aktuell forschen am Lehrstuhl über 50 wissenschaftliche Mitarbeiter auf den Gebieten Schaltungssystematik, Systemintegration und Signalverarbeitung im Mikrowellen- und Millimeterwellen- bis hin zum Terahertzbereich. Das Spektrum der Forschungsarbeiten am LHFT erstreckt sich von passiven und aktiven Komponenten bis hin zu kompletten Radar-, Funk-, Ortungs- und Transpondersystemen sowie der dazugehörigen Signalverarbeitung und den eingebetteten Echtzeitplattformen.

BU Wuppertal

Auf dem Hintergrund der Astroteilchenphysik und der Physik mit Neutrinos verfügt die BUW über einschlägige Expertise zu den Eigenschaften von Eis und zur Signalausbreitung im Eis

mit Akustik und Radiowellen. Auch der Bau von komplizierter Messtechnologie, welche an das technisch machbare heranreicht, wurde in Experimenten wie KATRIN und IceCube von der BUW erfolgreich entwickelt und zur Verfügung gestellt.

GloMic GmbH

Die GloMic GmbH ist auf die Entwicklung von Hochfrequenz- und Mikrowellen-Leistungsverstärkern spezialisiert. Im Fokus der Firma stehen dabei besonders leistungsstarke und hocheffiziente Leistungsstufen, vorwiegend auf Basis des relativ neuen Halbleitermaterials Gallium-Nitrid (GaN). Zu dem Produktportfolio gehören Verstärker für die Kommunikationstechnik, die Radartechnik, die Hochfrequenzmesstechnik und Hochleistungsverstärker im HF-, VHF- und UHF-Bereich für Einsatzbereiche in der industriellen Prozesstechnik.

RWTH Aachen

Die Forschungsschwerpunkte des III. Physikalischen Instituts sind die Elementarteilchenphysik und Astroteilchenphysik. Es besteht eine langjährige Expertise im Bau von komplexen Detektoren und ihrer Messelektronik. Durch die Forschung mit dem IceCube-Neutrinoobservatorium [5] und dem SPATS Detektor [6] am Südpol ist die Forschungsarbeit unter den extremen Bedingungen der Antarktis bestens bekannt. Darüber hinaus ist die Anwendung akustischer Messverfahren in Gletschereis über die Beteiligung am EnEx-Verbundvorhaben [7] und der anschließenden Durchführung des EnEx-RANGE-Vorhabens [8], [9] langjähriger Bestandteil der Forschung am III. Physikalischen Institut.

2.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

2.3.1. Aufgabenverteilung

Entsprechend des Projektantrages wurde die Planung und Durchführung des Gesamtprojektes in nachfolgende 7 Hauptarbeitspakete gegliedert, wobei die Verbundführung bei der FAU Erlangen lag. Eine Übersicht aller Arbeitspakete des Vorhabens ist in Abbildung 2 gegeben.

- **AP1000 Projektmanagement** – FAU: 6,75 PM
- **AP2000 Entwicklung Radarsystem** – RF-FRS – FAU: 29 PM, GloMic: 1 PM
- **AP3000 Entwicklung Permittivitätssensorik** – PS-FRS – BUW: 31 PM
- **AP4000 Entwicklung Pulsverstärker** – PA-FRS – GloMic: 28 PM
- **AP5000 Akustische Vorfelderkundung** – AC-FRS – RWTH: 26 PM
- **AP6000 Integration** – FAU: 8,5 PM, BUW: 13,25 PM, RWTH: 3,75 PM, GloMic: 1 PM
- **AP7000 Feldtest** – FAU: 5,75 PM, BUW: 5,75 PM, RWTH: 3,75 PM

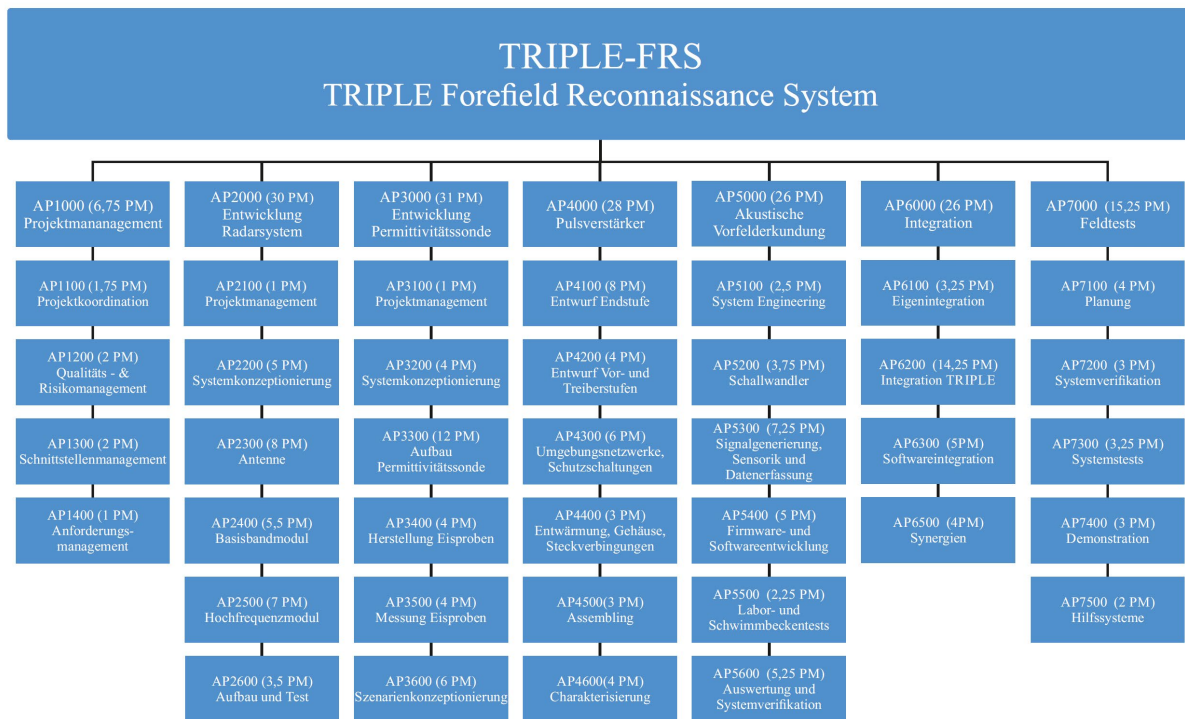


Abbildung 2: Graphische Übersicht des Projektstrukturplans

2.3.2. Projektverlauf

Während der Projektlaufzeit fand ein intensiver Austausch zwischen den Partnern in Form von regelmäßigen, vierzehntägigen Videokonferenzen statt. In diesen Treffen wurden aktuelle organisatorische Fragen besprochen. Sie dienten auch der Vorbereitung auf anstehende Ereignisse wie die TRIPLE Concurrent Engineering (CE) Studie, verschiedenen Reviews (CRR, Preliminary Component Review (PCR) und Final Component Review (FCR), siehe Meilensteinplan), Arbeitstreffen und Feldtests. Als weiterer niedrigschwelliger Kommunikationskanal wurde Slack genutzt. Der Datenaustausch ist, wo nötig, über cloudbasierte Speicher realisiert worden.

Tabelle 1: Übersicht über die Meilensteine in TRIPLE-FRS

Abkürzung	ursprüngliches Datum	tatsächliches Datum	Beschreibung
KO	Juli 2020	Juli 2020	Kick-Off
CE-I	Sept.2020	Sept.2020	CE-Studie I
CRR	Sept.2020	Sept.2020	Component Requirement Review
I-GT-1	Mai/Juni 2021	Mai/Juni 2021	Integration Gletschertest-1
CE-II	Juni 2021	Nov.2021	CE-Studie II
GT-I	Juli 2021	Juli/Aug. 2021	Gletschertest-1, Langenferner
PCR	Nov. 2021	Aug. 2022	Preliminary Component Review
GT-IA	-	März/Febr. 2022	Gletschertest-1A, Aletschgletscher
FCR	Juli 2022	Dez.2022/Jan.2023	Final Component Review
I-GT-2	Jan. 2023	Febr./März 2023	Integration Gletschertest-2
GT-2	Febr./März 2023	März/April 2023	Gletschertest-2, Aletschgletscher
PE	Juni 2023	Nov. 2023	Abschlusspräsentation

Der Projektverlauf von TRIPLE-FRS ist anhand der gesetzten Meilensteine entsprechend der Gesamtvorhabenbeschreibung in Tabelle 1 dargestellt. Im Projektverlauf gab es nur geringfügige Abweichungen vom ursprünglichen Zeitplan. Alle Änderungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Zuwendungsgeber durchgeführt. Im Folgenden wird auf die Änderungen im Einzelnen eingegangen.

Durch Nutzung von Synergien mit dem Vorhaben EnEx-AsGAR ergab sich die Möglichkeit, einen weiteren Gletschertest (GT-IA) im Februar/März 2022 auf dem Aletschgletscher durchzuführen. Um die Ergebnisse aus diesem Feldtest sowie dem Gletschertest GT-I im PCR berücksichtigen zu können, wurde der PCR zunächst auf Mai 2022 verschoben. Im Rahmen zusätzlicher Reviews (PDR, SRR) im Rahmen von TRIPLE-nanoAUV kam es anschließend zu einer nochmaligen Verschiebung des PCR auf August 2022, um Erkenntnisse und Input aus dem SRR und PDR berücksichtigen zu können. Folglich wurde auch der FCR zeitlich verschoben und im Januar 2023 durchgeführt. Das Projekt konnte planmäßig unter Erreichung aller Ziele am 30.06.2023 abgeschlossen werden. Die Abschlusspräsentation wurde mit allen Projektpartnern Anfang November per Zoom-Konferenz abgehalten.

2.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Radarsysteme gibt es weltweit in sehr vielen verschiedenen Ausführungsformen hinsichtlich Frequenzbereich, Signalform und allgemeiner Systemstruktur. Im Rahmen von EnEx-AsGAR wurde bereits an der FAU Erlangen ein flug- und bodengestütztes (also oberhalb des Eispanzer arbeitendes) Radarsystem für den Frequenzbereich von 700 MHz bis 4,7 GHz und Messungen im glaziologischen Umfeld entwickelt und erprobt. Zeitgleich wurde von der BU Wuppertal an einem radarbasierten Verfahren und Sensorkonzept zur in-situ Bestimmung der Permittivität des Eises geforscht, das nötig ist, um die Radardaten sinnvoll auswerten zu können. Allerdings waren beide Systeme nicht ohne umfangreiche und tiefgehende Anpassungen in den Kopf, bzw. den Körper des Schmelzroboters integrierbar. Zudem waren sie für die Vorfelderkundung im Eis auch funktional nicht ausgelegt. Sie mussten somit sowohl bzgl. des Sensorkonzepts als auch der konstruktiven Umsetzung verändert werden. Auch Sonarsysteme sind sowohl in der Glaziologie, als auch in der Hydrologie Standardsysteme und werden zur Exploration genutzt. Allerdings sind entsprechende kommerzielle Systeme, welche für die Anwendung in der Glaziologie genutzt werden, typischerweise Sensorketten von mehreren 10 m Länge, und somit nicht in einen Schmelzroboter integrierbar. Im Rahmen des EnEx-Verbundprojekts wurden bereits akustische Vorfelderkundungs- und Lokalisierungssysteme für den EnEx-IceMole erforscht und in EnEx-RANGE weiterentwickelt. Auf Basis der Hardware dieses Lokalisierungssystems sollte für die TRIPLE-Einschmelzsonde ein aktives Echolot als Teil des hybriden Vorfelderkundungssystems entwickelt werden, welches speziell zur Detektion von Hindernissen im Eis, sowie des Eis-Wasser-Übergangs optimiert ist.

FAU

Bei der Bildgebung von glazialen Strukturen hat sich die Nutzung von Radarsystemen zur subglazialen Exploration in den vergangenen Jahrzehnten etabliert, da trockenes Eis insbesondere im, für Radarsysteme niedrigen Frequenzbereich nahezu transparent erscheint. So können Glaziologen beispielsweise das kilometerdicke Eisschild der Antarktis mittels Radartechnik vermessen. Dabei kommen allerdings primär niederfrequente Pulsradare zum Einsatz. Dies erlaubt hohe Eindringtiefen, allerdings bei vergleichbar niedriger Auflösung und dem Einsatz großer Antennen. Im Rahmen des Vorhabens EnEx-AsGAR (2017-2022) wurde bereits erfolgreich an der Lokalisation einer Schmelzsonde mittels Radartechnik [10] sowie der Entwicklung eines FMCW Bodenradars für die subglaziale Bildgebung von Strukturen im Eis geforscht [11]. Zusätzlich konnten im Rahmen von EnEx-AsGAR bereits erste Erfahrungen mit der Planung und Durchführung von Feldtests gewonnen werden.

BU Wuppertal

Durch vorangegangene Arbeiten der Arbeitsgruppe Astroteilchenphysik besteht bereits Sachkenntnis im Detektorbau, Arbeiten unter extremen und kalten Bedingungen, sowie der Ortung im Eis [12]. Erste tiefer gehende Erfahrungen mit der Installation eines Oberflächenradars, sowie der Durchführung und Auswertung von Messungen in der Antarktis wurden an der BU Wuppertal bereits gesammelt. An der Ortung und Lokalisierung im Eis, zunächst unter Nutzung akustischer Signale, wurde außerdem im Rahmen des EnEx-Verbundvorhaben (2012-2015) geforscht [13]. Dabei wurden generelle wichtige Erkenntnisse bezüglich der Lokalisierung im Medium Eis, sowie Erfahrungen zur Planung und Durchführung von Gletscherfeldtests gewonnen. Im Rahmen von EnEx-AsGAR wurde von 2017 bis 2022 an der Bestimmung der Permittivität von Eis gearbeitet. Dabei wurden bereits Feldtests durchgeführt, und die Permittivität in den obersten Gletscherschichten unter Verwendung eines FMCW-Radars ermittelt [14].

GloMic GmbH

Die Arbeit wurde nach umfassendem Literaturstudium auf Basis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik in Bezug auf einen Pulsverstärker durchgeführt. Besondere Aufmerksamkeit genoss dabei die Hochfrequenzleistungserzeugung unter besonderer Berücksichtigung des Kurzpulsverhaltens.

Wegen des enormen technologischen Fortschritts auf dem Gebiet der Gallium Nitrid (GaN) Heterostrukturbauelemente wurde von vornherein auf diese Technologie gesetzt, was sich im Projektverlauf als sinnvoll erwies. GaN-Hochfrequenztransistoren weisen gegenüber Siliziumbauelementen höhere Grenzfrequenzen, Schaltgeschwindigkeiten, Leistungsdichten und eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf [15], [16]. Dafür wurden einige bekannte Nachteile in Kauf genommen: Die sehr frühe und weich einsetzende Kompression der Ausgangsleistung (Soft-Compression) [17] [18], die frequenz- und zeitabhängige Veränderung der Transistorparameter wie z. B. Verstärkung, Ausgangsleitwert etc. (Dispersion) [19] und die derzeit noch unzureichend beschriebene elektro-thermische Kopplung in heute verfügbaren GaN Transistormodellen von CAE-Werkzeugen [20]. Der Beseitigung bzw. zumindest der Minimierung dieser nachteiligen Bauelemente-Einflüsse wurde im Verlauf der Konzeptionsphase große Aufmerksamkeit gewidmet - durch umfassende Untersuchungen zur Schaltungstopologie und zur Auswahl von Verstärkerklasse, Transistorgröße,

Combiningmethode und Biaskonzept. Aufgrund der zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen war es naheliegend, auf eine planare Hybridtechnologie in Streifenleitungstechnik zurückzugreifen (Microwave integrated Circuit- oder MIC-Technologie) [21].

RWTH Aachen

Bei der Entwicklung der Sonar-Komponente des TRIPLE-FRS konnte die RWTH Aachen auf eine langjährige Expertise im Bau und Betrieb von akustischen System für den Einsatz in Eis sowie in der Planung und Durchführung von Gletschertest zurückgreifen. Diese Expertise beruht einerseits auf der Forschung mit dem IceCube-Neutrinoobservatorium [5] und dem SPATS Detektor [6] unter den extremen Bedingungen der Antarktis. Andererseits resultiert sie aus der Beteiligung am EnEx-Verbundvorhaben [7] und der anschließenden Durchführung des EnEx-RANGE-Vorhabens [8], [9]. In diesen Vorhaben wurden akustische Navigationssysteme zur Lokalisierung und Vorfelderkundung des EnEx-IceMoles entwickelt. Zusätzlich wurde innerhalb von EnEx-RANGE ein Referenznetzwerk aus autonomen Schmelzsonden, sogenannte Autonomous Pinger Units (APUs), zur Lokalisierung des EnEx-IceMoles verwendet und in mehreren Gletschertests demonstriert. Die akustische Instrumentierung dieser APUs bildete die Basis für die Entwicklung in TRIPLE-FRS.

2.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen und Kollaborationen

Zusammenarbeit erfolgte vor allem mit den Partnern der TRIPLE-Projektlinie und den Projekten der EnEx-Initiative. Zum Erfahrungsaustausch wurden die Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen und die im Rahmen der Synergietreffen durchgeführten Arbeitstreffen genutzt. Dadurch konnte TRIPLE-FRS an mehreren Stellen von der breit gefächerten Expertise im Umfeld der TRIPLE-Projekte profitieren. Hier sind besonders die GSI GmbH, die ihre Unterstützung für Themen im Bereich der Schmelzsondenkomponenten anbot, und die Abteilung für ökologische Chemie des Alfred-Wegener-Institut (AWI), die bei der druckneutralen Auslegung der im FRS verbauten Permittivitätssensoren half, zu nennen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Zusammenarbeit beinhaltet die Planung und Umsetzung von Testkampagnen. Unter Nutzung von Synergien im Umfeld von TRIPLE, wurden erfolgreich Feldtests auf Alpengletschern in Italien und der Schweiz zusammen mit den Projekten EnEx-AsGAR und TRIPLE-IceCraft durchgeführt. Zusätzlich wurden Schwimmbadtests zusammen mit TRIPLE-nanoAUV umgesetzt. Anpassungen und Optimierungen des Arbeitsplans wurden, wenn erforderlich, in enger Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber durchgeführt.

3. Aufgabenstellung FAU

Die TRIPLE-Projektlinie des DLR hat zum Ziel, Technologien für eine mögliche Europa-Mission zur Erforschung subglazialer Ozeane zu entwickeln. Das Ziel des Vorhabens TRIPLE-FRS ist es, ein hybrides Vorfelderkundungssystem basierend auf Radar und Sonar für Schmelzsonden zu entwickeln. Die Aufgabe der FAU besteht darin, ein in den Kopf der Schmelzsonde integriertes Radarsystem und dazugehöriger Auswertearithmetik zu entwickeln.

Die Ziele des Projektes umfassen:

- Entwicklung eines geeigneten Radarsystems
- Entwicklung und Aufbau einer in den Schmelzkopf integrierten Antennenstruktur
- Integration des Hochleistungsimpulsverstärkers des Projektpartners GloMic GmbH in das Radarsystem
- Integration des Radarsystems in den FRS-Schmelzsondendemonstrator
- Entwicklung von Bildgebungsalgorithmen
- Demonstration der entwickelten Technologien in Feldversuchen

4. Darstellung der Ergebnisse

4.1. Entwicklung des Radarsystems

4.1.1. Konzeption des Radarsystems

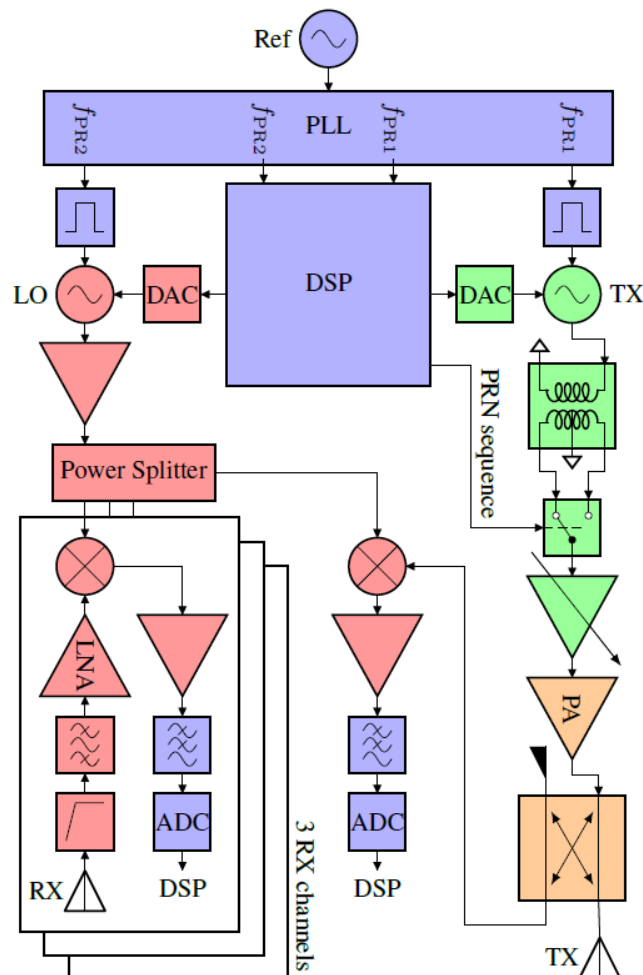


Abbildung 3: Blockschaltbild des Radarsystems

Das in Abbildung 3 dargestellte Konzept des Radarsystems ist ein kohärentes Impulsradarsystem mit sequentieller Abtastung und Pseudo-Random-Noise-Signalcodierung bei einer Trägerfrequenz von 1,35 GHz und einer Bandbreite von 100 MHz (10ns Pulsdauer). Der gewählte Frequenzbereich stellt hierbei einen Kompromiss zwischen den Dämpfungsverlusten bei der Ausbreitung im Eis und der Antennengröße dar, wobei die Bandbreite von 100 MHz eine hinreichende Auflösung für die Anwendung erlaubt. Das System ist modular aufgebaut und besteht aus einem Basisbandmodul, einem Sendemodul sowie einem mehrkanaligen Empfangsmodul für eine verbesserte Winkelschätzung zum Ziel. Das Radarsystem verfügt über vier in den Schmelzkopf der Sonde integrierten Antennen. Die jeweiligen Teilsysteme werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben.

4.1.2. Antennen

Die Entwicklung der Antennen für eine Integration in den Schmelzkopf (Durchmesser 198 mm) einer Schmelzsonde stellt eine sehr große Herausforderung dar, insbesondere unter Anbetracht des anvisierten Frequenzbereichs von 1,3 GHz bis 1,4 GHz. Antennen skalieren in der Regel mit der Wellenlänge, was wiederum bedeutet, dass für niedrige Frequenzen die Antenne entsprechend größer wird. Gleichzeitig steht eine Miniaturisierung der Antenne im direkten Konflikt mit der Bandbreite und somit dem Auflösungsvermögen des Radarsystems. Für die geforderte Richtungsinformation von Radarzielen ist zudem eine Winkelschätzung nötig, was die Integration eines Antennen-Arrays in den Schmelzkopf voraussetzt und somit den Platzbedarf eines einzelnen Antennenelements weiter einschränkt. Da die Antennen in den Kopf integriert werden müssen, ist zudem eine weitere Anforderung an die Wärmeleitfähigkeit der Antennenstruktur gegeben. Es muss sichergestellt sein, dass die Antennen die Wärmeverteilung im Kopf und somit die Schmelzfähigkeit der Sonde so geringfügig wie möglich beeinflussen.

Als Lösungsansatz wurde eine planare Vivaldi-Antenne auf einem Keramik-Substrat gewählt, die zusätzlich in einen Keramikzylinder eingefügt wird. Basierend auf der Wärmeleitfähigkeit von typischen technischen Keramiken wurde Aluminiumnitrid gewählt, welches mit $\lambda > 180 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$ eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu anderen Keramiken, insbesondere denen, die typischerweise in der Hochfrequenz- bzw. Antennentechnik (z.B. Aluminiumoxid) eingesetzt werden, besitzt, vgl. Abbildung 4.

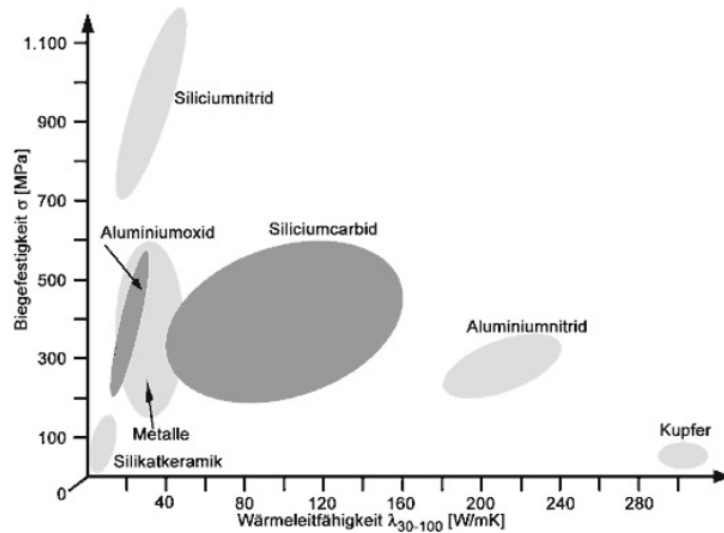


Abbildung 4: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Materialien. Grafik: Verband der Keramischen Industrie e.V.

Neben der extrem hohen thermischen Leitfähigkeit von Aluminiumnitrid, die der thermischen Leitfähigkeit des Basismaterials Hovadur® CNCS des Schmelzkopfs ($\lambda = 220 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$) sehr nahe kommt, hat Aluminiumnitrid eine vergleichsweise hohe Permittivität ($\epsilon_r > 8,6$), was dazu beiträgt die Antennengröße deutlich zu reduzieren. Tabelle 2. zeigt einen Überblick der thermischen Leitfähigkeit in Kombination mit der Permittivität für verschiedene Werkstoffe. Nur Silizium-Keramiken auf Karbidbasis bieten eine vergleichbare Charakteristik bezüglich Miniaturisierung und thermischer Leitfähigkeit. Aufgrund der besseren Verfügbarkeit und der einfacheren Bearbeitbarkeit von Aluminiumnitrid, wurde das Material AlN180 von dem Hersteller ceratec GmbH gewählt.

Tabelle 2: Vergleich der thermischen Leitfähigkeit in Kombination mit der Permittivität für verschiedene Werkstoffe

Material	λ (W/mK)	ϵ_r
Copper alloys	160-390	-
Hovadur®CNCS	220	-
Aluminum alloys	75-230	-
Steel	11-55	-
Aluminum Nitride (AlN)	80-200	9.2
AlN180	180	8.6
Alumina (Al ₂ O ₃)	15-30	9.3
Silicon Carbide (SiC)	100-200	9.7
Silicon Nitride (Si ₃ N ₄)	7-40	4
Titanium Dioxide (TiO ₂)	6.5	86
Zirconia (ZrO ₂)	1-2	12.5
FR-4	0.4	3.6

Das Antennendesign wurde mit CST Microwave Studio simulativ entwickelt und optimiert. Das Ergebnis ist eine Antennen-Konfiguration von einer Sende- (Tx) und drei Empfangsantennen (Rx) bei einem vorgegebenen Schmelzkopfdurchmesser von 198 mm. Die Antennen sind dabei symmetrisch zueinander angeordnet. Jede Einzelantenne hat einen Durchmesser von 58 mm bei einer Länge von 70 mm und besteht dabei aus insgesamt vier Einzelteilen, gezeigt

in Abbildung 5. Das Hauptelement der Antenne ist die planare Vivaldi-Antenne, die von zwei baugleichen Keramik-Halbzyklindern umschlossen und von vorne mit einer kreisrunden Scheibe als Deckel, ebenfalls aus Keramik, verschlossen ist. Um die Fertigungskosten zu reduzieren, wurden die Halbzyklinder symmetrisch ausgeführt, weshalb eine zweite, leere Nut zu sehen ist, siehe Abbildung 6. Der Deckel wurde als separate Scheibe ausgeführt, ebenfalls um die Fertigungsprozesse zu vereinfachen. Der Deckel wird dabei von der Vorderseite in den Schmelzkopf eingepasst, wohingegen die beiden Halbzyklinder zusammen mit der Planarantenne von der Rückseite in gefräste Taschen eingebaut werden, vgl. Abbildung 7.

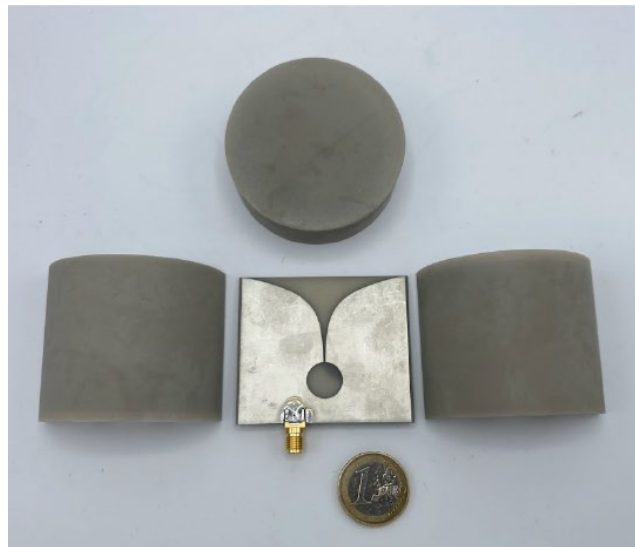


Abbildung 5: Einzelelemente einer auf Aluminium-Nitrid (AlN) basierten Antenne vor der Integration in den Schmelzkopf

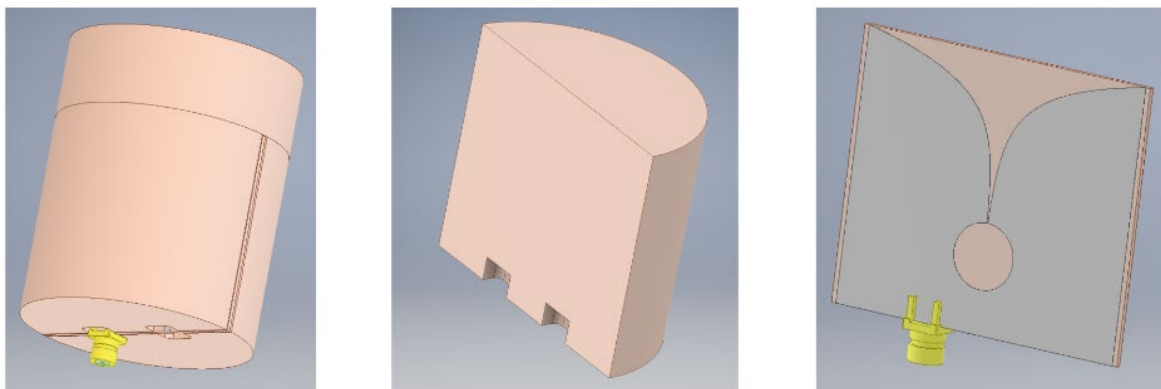


Abbildung 6: Entwickelte Antennenstruktur: Zusammenbau, Halbzyklinder und planare Vivaldi-Antenne

Die metallisierte Struktur auf der planaren Antenne wurde simulativ darauf optimiert, maximale Bandbreite und Anpassung zu erreichen, wenn reines Eis mit $\epsilon_r = 3,15$ vor der Antenne vorliegt. Da der Einsatz der Antennen in reinem Eis nicht immer gewährleistet werden kann, wurde bei der Simulation der Antennen das umgebende Medium variiert, um möglichst realistische Bedingungen zu schaffen.



Abbildung 7: Rückseite und Vorderseite des CNC-bearbeiteten Schmelzkopfs vor der Integration der Antennen

Abbildung 8 zeigt die simulierte Anpassung der Antenne bei verschiedenen Permittivitäten. Für reines Eis beträgt die Anpassung < -15 dB über den gewünschten Frequenzbereich von 1,3 GHz bis 1,4 GHz. Auch bei einer Permittivität von $\epsilon_r = 2$ wird noch eine Anpassung von < -8 dB erreicht. Um die Simulation zu verifizieren, wurde ein PMMA Zylinder ($\epsilon_r = 2,6$) mit einer Länge und Durchmesser von jeweils 100 mm direkt vor eine der gefertigten Antennen gehalten und die s11-Parameter mit einem VNA vermessen. Der Vergleich der Messung der Anpassung mit der Simulation in Abbildung 9 zeigt eine akzeptable Übereinstimmung der Kurven, wobei eventuelle Abweichungen auf Herstellungsungenauigkeiten und Unsicherheiten der dielektrischen Eigenschaften beider Substrate sowie der AIN Komponenten zurückzuführen sind. Abbildung 10 zeigt die simulierte Abstrahlcharakteristik des Antennen Arrays bei einer Mittenfrequenz von $f_c = 1,35$ GHz. Der 3 dB Öffnungswinkel beträgt hierbei ca. 90° in Elevation und Azimuth bei einem Antennengewinn von 5,5 dBi nach vorne.

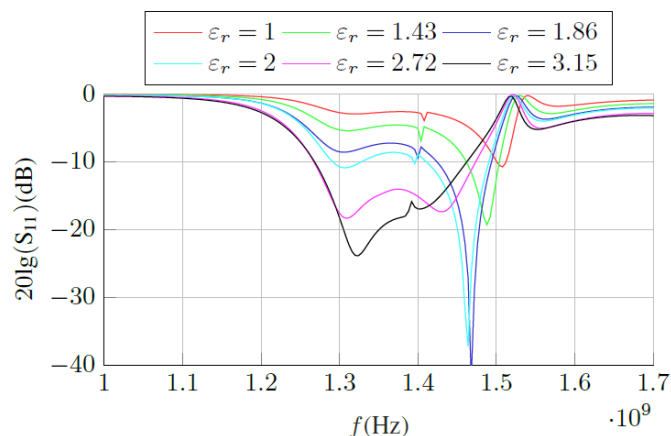


Abbildung 8: Simulierte Anpassung einer Einzelantenne bei unterschiedlicher Permittivität vor der Antenne

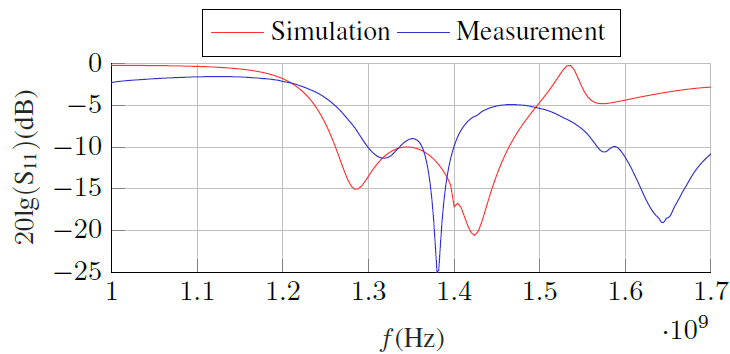


Abbildung 9: Vergleich Simulation und Messung der Anpassung einer Einzelantenne bei einer Permittivität von $\epsilon_r = 2,6$ vor der Antenne

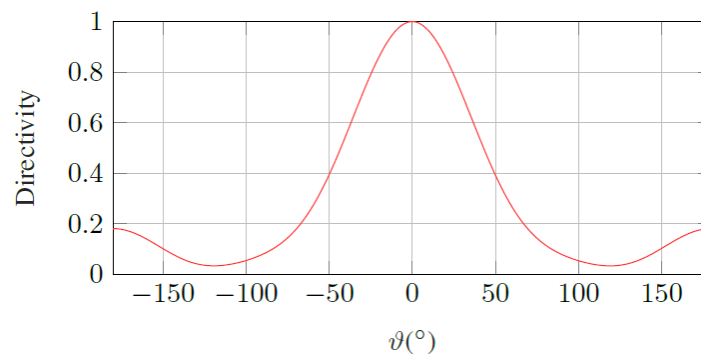


Abbildung 10: Simulierte Abstrahlcharakteristik des Antennen Arrays bei einer Mittenfrequenz von $f_c = 1,35$ GHz

4.1.3. Basisbandmodul

Das entwickelte FPGA Basisbandmodul dient der Erzeugung der für das Sequential Sampling notwendigen Pulswiederholfrequenzen PRF1 und PRF2 (siehe Abbildung 3), der Abtastung und Digitalisierung der Empfangssignale sowie der anschließenden Signalverarbeitung der Radardaten. Ferner dient es als Steuerung des kompletten Radarsystems und bildet die Schnittstelle zwischen Radarsystem und dem FRS Gesamtsystemmanagement. Kern des FPGA Basisbandmoduls ist ein Xilinx UltraScale+ MPSoC FPGA-Board mit integrierter Central Processing Unit (CPU). Ausgehend von einer 50 MHz Quarzoszillator erzeugt ein Phase Locked Loop (PLL)-Chip (LMK04808) die beiden Pulswiederholfrequenzen PRF1 und PRF2. Für die Realisierung der kurzen Rechteck-Steuerimpulse (10 ns entsprechend 100 MHz Modulationsbandbreite) zur Ansteuerung der zwei Pulsoszillatoren sind jeweils zwei Clock-Ausgänge der PLL mit den Eingängen eines Nicht-Und-Gatters (NAND-Gate) verbunden. Durch Verzögern eines der beiden Clock-Ausgänge kann die Pulsbreite variiert werden. Die Verzögerung erfolgt über ein einstellbares digitales Verzögerungsglied innerhalb der PLL. Gleichzeitig erzeugt die PLL die Taktsignale für die vier Analog Digital Converter (ADCs). Die mit PRF2 abgetasteten IF-Signale gelangen zunächst parallel in die programmierbare Logik des FPGA, wo diese anschließend über einen First-In-First-Out (FIFO) Speicher und Direct Memory Access (DMA) direkt im DDR4-Speicher abgelegt

werden. Anschließend findet eine Signalverarbeitung der Rohdaten seitens der CPU statt, bevor die Daten auf der SD-Karte des RF-FRS gespeichert werden und zusätzlich über Ethernet an das Gesamtsystem übergeben werden. Abbildung 11 zeigt das aufgebaut Basisbandmodul.

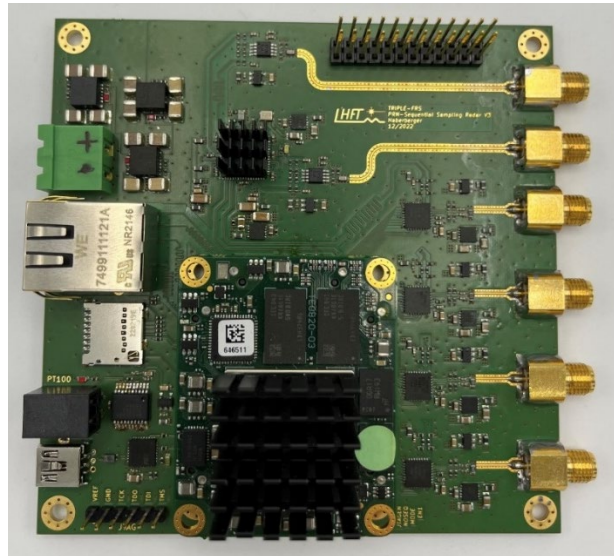


Abbildung 11: Aufgebautes Basisbandmodul

4.1.4. Hochfrequenzmodul

Das entwickelte Hochfrequenzmodul umfasst ein Sende- und ein Empfangsmodul, die getrennt voneinander auf zwei Platinen aufgebaut wurden. Der Sendekanal dient der Erzeugung des Hochfrequenz (HF)-Sendepulses, der vom PA-FRS verstärkt und über die Sende (TX)-Antenne abgestrahlt wird. Ein schaltbarer Pulsoszillator, der seinen Steuerimpuls vom FPGA Basisbandmodul mit PRF1 bekommt, erzeugt einen HF-Puls bei einer Trägerfrequenz von 1,35 GHz und einer Bandbreite von 100 MHz, siehe Abbildung 8. Eine dem Pulsoszillator nachfolgende Kombination aus einem Balun und HF-Schalter ermöglicht eine binäre Phasenmodulation des Sendepulses mit einem pseudo-binärem Rauschsignal (z.B. M-Sequenz, Gold-Code, etc.). Eine anschließende Korrelation der Empfangssignale mit der Rauschsequenz in der Signalverarbeitung ermöglicht eine effektive Rauschunterdrückung und somit eine höhere Reichweite des Radars. Das HF-Signal wird anschließend vorverstärkt, bevor es mit dem Leistungsverstärker der GloMic um weitere 40 dB verstärkt wird, um die geforderte Sendeleistung von mind. 100 W zu erzielen. Typischerweise werden für Radarsysteme Anforderungen für die Reichweite und nicht für die Sendeleistung gestellt. Dies hängt allerdings auch stark vom umgebenden Medium ab, daher wurde im Rahmen des Vorhabens ein Fokus auf maximale Performance des Radarsystems gelegt. Die Ausgangsleistung von über 100 W resultiert aus einer ersten Machbarkeits-Studie seitens GloMic GmbH für den Power Amplifier (PA). Ein einstellbares Dämpfungsglied vor dem Leistungsverstärker ermöglicht eine Einstellung der über die TX-Antenne abgestrahlten Sendeleistung. Über einen im PA-FRS verbauten Koppler wird ein Teil des Sendesignals ausgekoppelt und auf den Empfangspfad zurückgeführt, was mehrere Vorteile mit sich bringt.

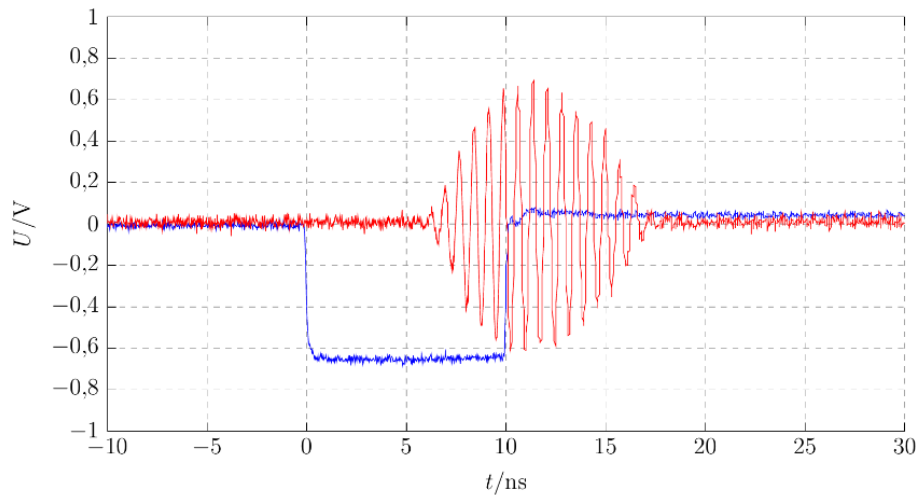


Abbildung 12: Oszillator Steuersignal (blau) und vom Oszillator erzeugter HF-Puls (rot)

Zum einen kann die Leistung am Ausgang des Leistungsverstärkers überwacht und ein potenzieller Ausfall des Systems erkannt werden. Weiterhin ist durch Abtasten des ausgekoppelten Signals die Signalform des Sendesignals und damit etwaige Verzerrungen durch beispielsweise Sättigung des Leistungsverstärkers bekannt. Eine Korrelation der Empfangssignale mit einem Inverse Matched Filter, welches basierend auf der Signalform des Sendesignals berechnet wird, ermöglicht eine weitere Rauschunterdrückung bzw. Steigerung des SNRs und damit eine Erhöhung der Reichweite des Radars. Da das Abtasten der Empfangssignale asynchron zum Aussenden des HF-Sendepuls erfolgt, dient das ausgekoppelte Signal gleichzeitig als Startpunkt bzw. Referenz für die Entfernungsmessung. Um das Rauschen des Oszillators in der Sendepause zu unterdrücken, ist ein zusätzlicher, vom FPGA angesteuerter HF-Schalter am Ausgang des Vorverstärkers verbaut. Somit kann die Isolation zwischen Sende- und Empfangskanal erhöht und damit die Dynamik des Radarsystems gesteigert werden. Zur zeitlichen Synchronisation sind die beiden Taktsignale PRF1 und PRF2 auf den FPGA zurückgeführt.

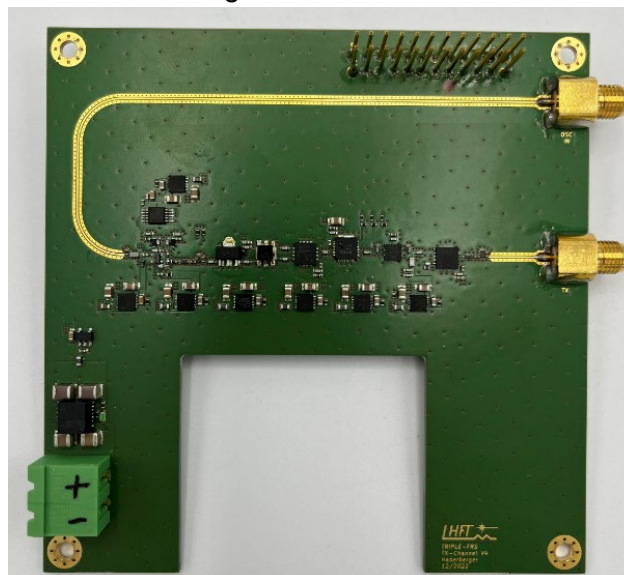


Abbildung 13: Aufgebautes Sendemodul

Der Empfangspfad dient dem Empfangen der von Radarzielen im Eis reflektierten Wellen und dem Umsetzen der Signale in einen Frequenzbereich, sodass eine Abtastung und Digitalisierung der Empfangssignale möglich ist. Aufgrund der geometrisch bedingten starken Kopplung der TX- und Empfangs (RX)-Antennen miteinander ist eine Limitierung der Leistung der Empfangssignale <12 dBm zwingend nötig, um nachfolgende Komponenten vor zu hoher Leistung zu schützen. Limiter am Eingang der drei Empfängerkanäle begrenzen daher die Leistung der von den Antennen aufgenommenen Leistung. Ein Bandpassfilter dient der Unterdrückung ungewünschter Störsignale außerhalb des Nutzbandes von 1,3 GHz bis 1,4 GHz. Low Noise Amplifier (LNA) dienen der Verstärkung der Eingangssignale bevor diese in das IF-Band heruntergemischt werden. Ein identisch zum Sendekanal aufgebauter schaltbarer Oszillator erzeugt einen in der Pulsform gleichen HF-Puls, der zum Abwärtsmischen der Empfangssignale in das IF-Band genutzt wird. Um den Aussteuerbereich der ADCs optimal auszunutzen werden die IF-Signale vor Abtastung nochmals verstärkt. Ein Tiefpassfilter fungiert als Antialias-Filter und unterdrückt unerwünschte Mischprodukte und Harmonischen.

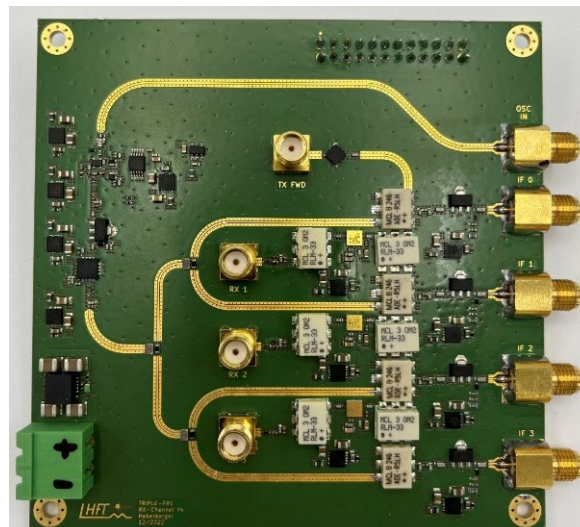


Abbildung 14: Aufgebautes Empfangsmodul

4.2. Integration

4.2.1. Mechanik

Für die mechanische Integration der Subsysteme in den FRS-Schmelzsondendemonstrator wurde zunächst ein CAD Modell des Schmelzsondendemonstrators mit der Software Autodesk Inventor erstellt und anschließend die einzelnen Komponenten entsprechend in das CAD eingefügt. Abbildung 15 zeigt das CAD Modell der vollständig integrierten FRS-Schmelzsonde. Die Befestigung der Radarelektronik erfolgt durch Verschraubung der im Schmelzsondendemonstrator vorhandenen 20x20 mm Aluminiumprofilen unter Verwendung von Nutzensteinen.

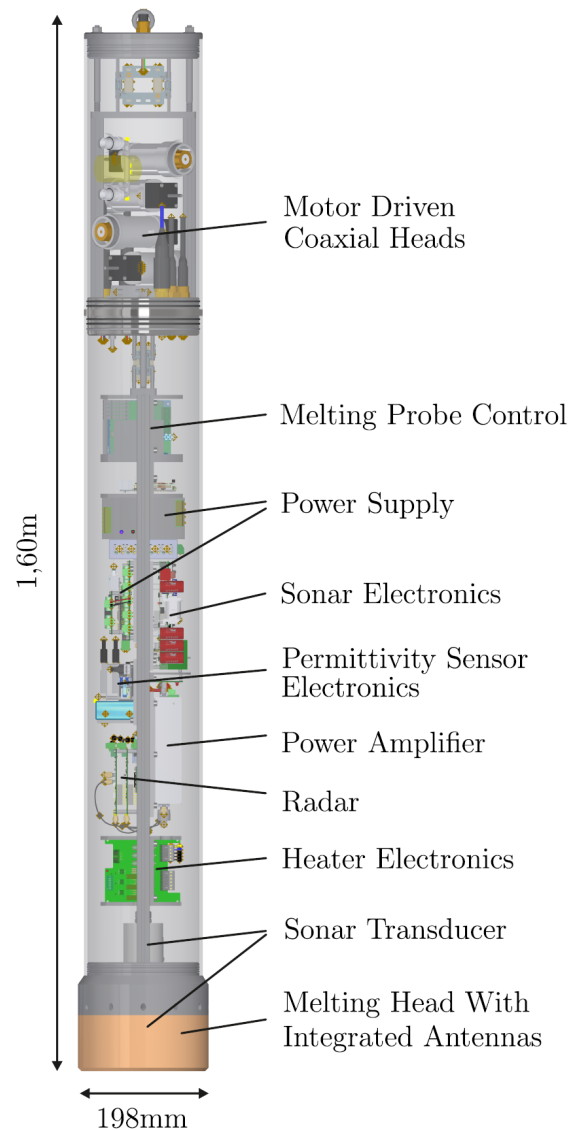


Abbildung 15: 3D-Modell des FRS-Demonstrators

Da das Radarsystem die Komponente des FRS mit den höchsten Frequenzen ist, wurde das Radarsystem möglichst nahe am Schmelzkopf direkt hinter der Heizersteuerung verbaut, um die HF-Koaxialleitungen möglichst kurz zu halten. Wie bereits beschrieben, werden insgesamt 4 Antennen in zylinderförmigen Aussparungen im Schmelzkopf eingelassen. Der Deckel wird dabei von der Vorderseite in den Schmelzkopf über eine Presspassung eingepasst, wohingegen die beiden Halbzylinder zusammen mit der Planarantenne von der Rückseite in gefräste Taschen eingeschoben werden, vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17. Für die finale Integration aller Teilkomponenten fand ein Treffen mit den Projektpartnern in Erlangen im Februar 2023 statt. Abbildung 18 zeigt das vollständig integrierte FRS in den Schmelzsondendemonstrator bei der Integration in Erlangen.



Abbildung 16: Schmelzkopf mit integrierten Antennen



Abbildung 17: Rückseite einer der in den Schmelzkopf integrierten Antennen

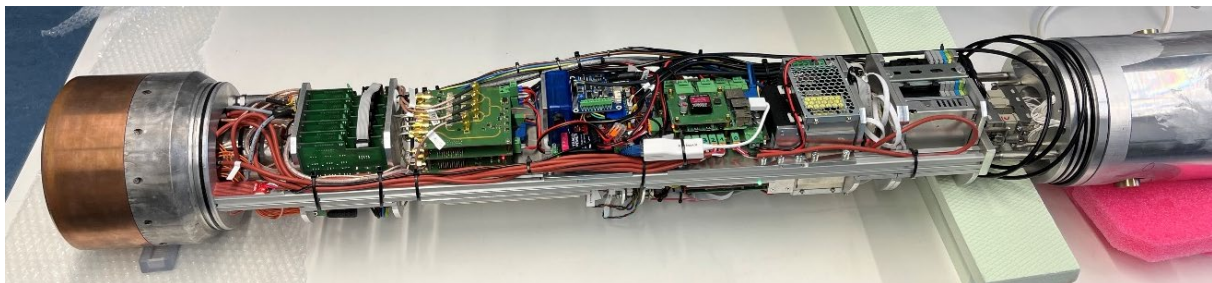


Abbildung 18: Vollständig integrierter FRS-Demonstrator (ohne Hülle)

4.2.2. Elektronik

Zur Stromversorgung der Systeme stehen 400 V im Schmelzsondendemonstrator zur Verfügung. Ein Netzteil erzeugt anschließend 48 V zur Versorgung der FRS-Systeme. Für eine gleichmäßige Lastverteilung wurde ein dreiphasiges Netzteil gewählt. Weiterhin wurde eine Platine entwickelt, welche die Spannung auf die einzelnen Subsysteme verteilt und es ermöglicht, Systeme individuell zu- oder abzuschalten. Gleichzeitig beinhaltet die

Spannungsversorgung eine separate Absicherung der einzelnen Stromkreise sowie eine Überwachung von Spannung, Strom und der Leistungsaufnahme der Subsysteme. Neben der Spannungsversorgung sind noch weitere Sensorsysteme zur Überwachung von Umgebungsparametern auf der Platine integriert. So können 6 Temperatursensoren vom Typ PT100, die im Schmelzkopf angebracht sind, angeschlossen werden und so die Temperaturverteilung im Kopf überwacht werden. Ein Leitfähigkeitssensor, der am, in Schmelzrichtung tieflegendstem Punkt innerhalb der Schmelzsonde angebracht ist, ermöglicht die Detektion von Wassereintritt in die Sonde. Druck- und Luftfeuchtigkeitsensoren geben ebenfalls Rückschluss auf die Dichtheit der Sonde. Eine inertielle Messeinheit (IMU) stellt Daten zur Orientierung und Beschleunigung der Schmelzsonde zur Verfügung. Gleichzeitig kann die entwickelte Platine auf einen Einplatinencomputer (Raspberry Pi), der als zentraler Computer die Steuerung und Kommunikation zwischen den Subsystemen übernimmt, aufgesteckt werden. Ein Blockschaltbild der Spannungsversorgung und der verbauten Sensorsysteme ist in Abbildung 19 gezeigt. Die aufgebaute Platine ist in Abbildung 20 zu sehen.

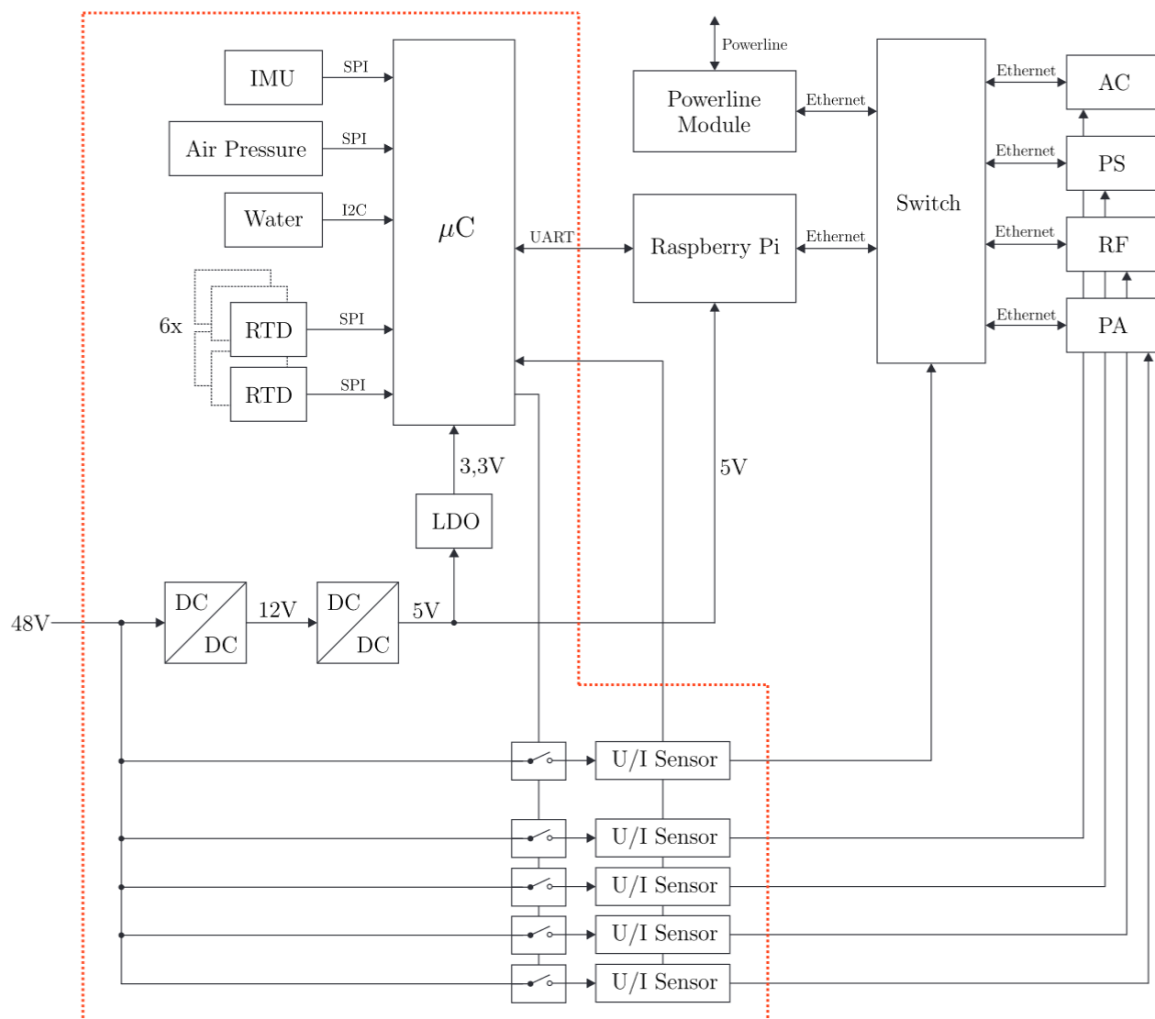


Abbildung 19: Blockschaltbild zur Spannungsversorgung der Systeme

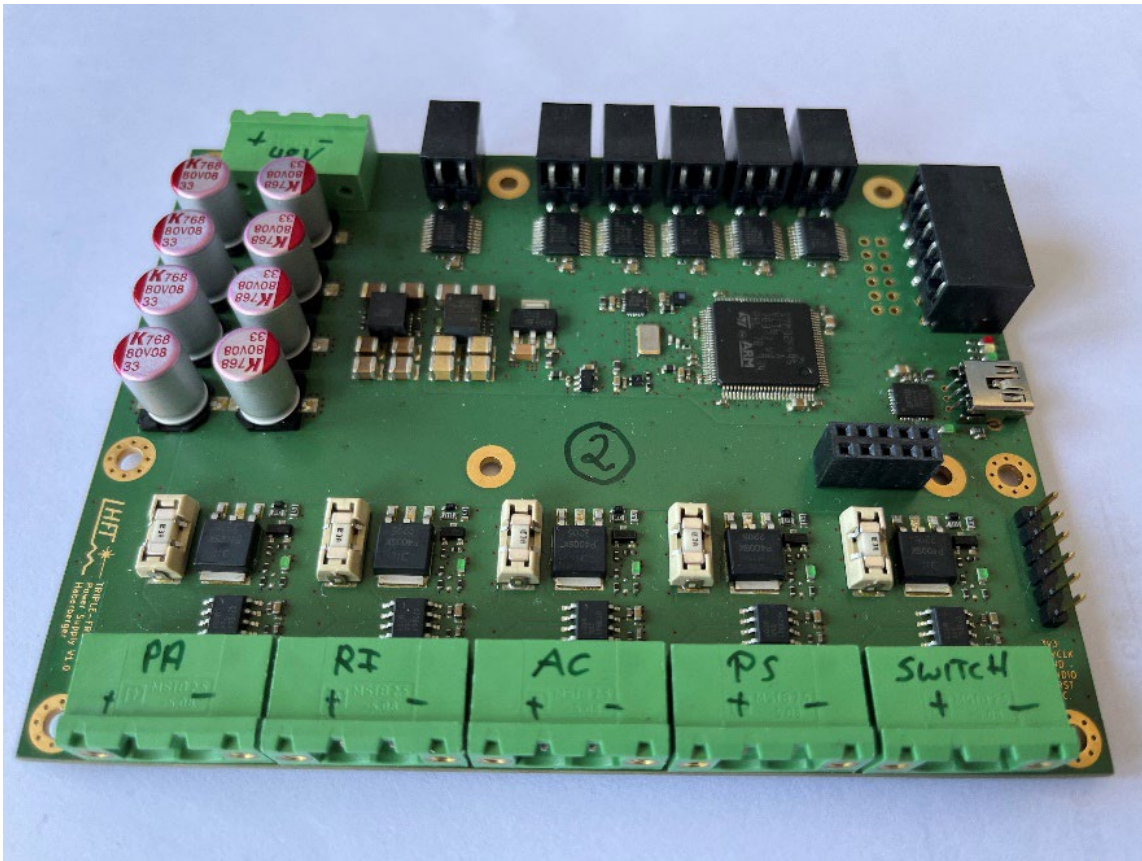


Abbildung 20: Platine zur Spannungsversorgung der Subsysteme

4.2.3. Software

Im Rahmen der Integration der Subsysteme hat die FAU ein Gesamtsystemmanagement bestehend aus einem Raspberry Pi inklusive Robot Operating System (ROS) entwickelt und implementiert. Das ROS dient als zentrale Kontrolleinheit und ermöglicht ein simples Verfahren zum Nachrichtenaustausch zwischen den einzelnen Subsystemen und dem Gesamtsystemmanagement. Das ROS versieht jede gesendete Nachricht mit einem Zeitstempel, wodurch eine Zuordnung der verschiedenen Daten der verschiedenen Subsysteme einfach möglich ist. Diese zeitliche Referenzierung bzw. Fusionierung dient der späteren Auswertung insbesondere bei der Identifikation von Zielen im Eis, die mit Radar- und/oder Sonarsystem detektiert werden. Sämtliche Nachrichten werden in einer Rosbag, einem Dateiformat für ROS Nachrichten, hinterlegt, wodurch auch bei einem plötzlichen Ausfall der Versorgung die Daten nachträglich zugänglich sind.

An der Bodenstation gibt es eine graphische Oberfläche (GUI), die es ermöglicht, die Schmelzsonde, sowie die Subsysteme zu steuern, vgl. Abbildung 21. Zusätzlich können auf der graphischen Oberfläche der aktuelle Betriebszustand sowie die aktuelle Einstellung der einzelnen Bestandteile angezeigt werden. Mit Hilfe des Gesamtsystems werden auch die einzelnen Subsysteme gestartet und ihre Messungen koordiniert. Dadurch bleibt der

Bodenstation und dem Operator immer auch die Möglichkeit vom Gesamtsystem auf die Subsysteme und deren Messabläufe zuzugreifen.

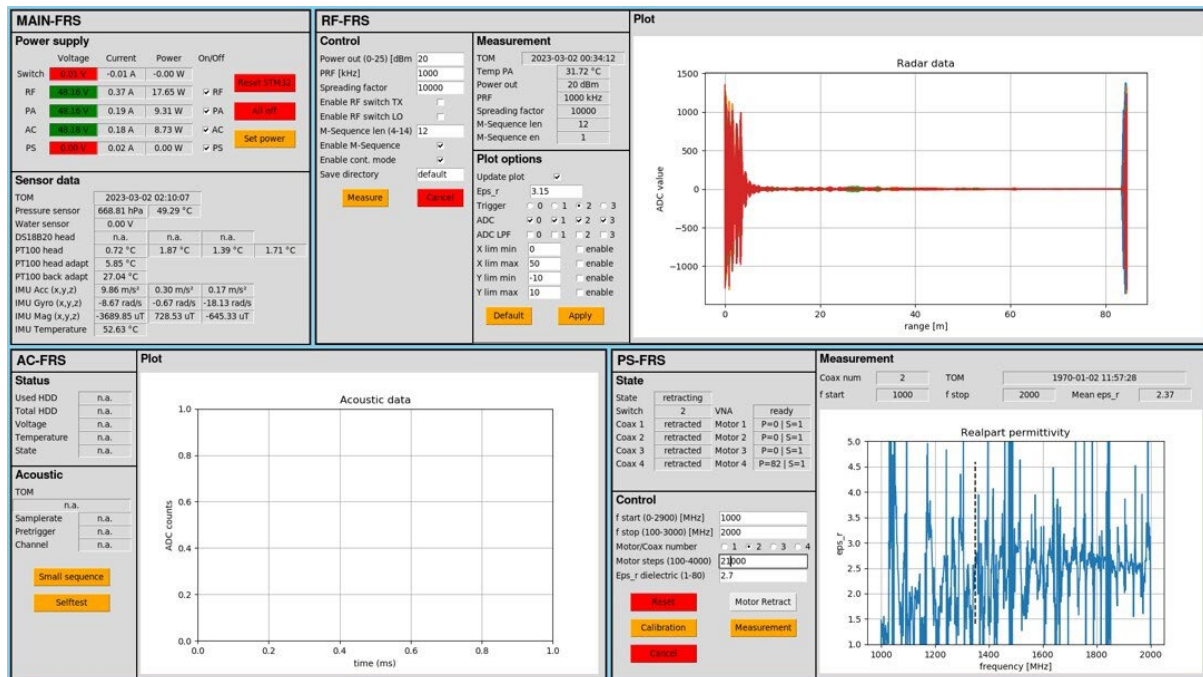


Abbildung 21: Implementierte Benutzeroberfläche (GUI)

4.3. Verifikation/ Feldtests

4.3.1. Freifeldmessung Flugplatz Marloffstein

Um das Radarsystem auch außerhalb von Feldtests auf Alpengletschern im Freifeld im Medium Luft testen zu können, wurde ein Messaufbau wie in Abbildung 22 gezeigt aufgebaut. Der Messaufbau befindet sich am Flugplatz in Marloffstein und besteht aus dem Sequential Sampling Impulsradar inklusive Pulsverstärker des Projektpartners GloMic GmbH, zwei richtscharfen Hornantennen des Herstellers NSI MI (Modell ANT-SGH-1.12-1.7) mit einem Antennengewinn von jeweils $G = 15,9$ dBi, montiert auf einem Stativ, einer mobilen 48 V Stromversorgung sowie einem Laptop zur Steuerung und Datenauswertung des Radars. Wie in Abbildung 22 gezeigt, wurde ein Corner Reflektor im Abstand von 100 m zum Radar platziert. Abbildung 23 zeigt das dazugehörige Radarecho, einmal mit und einmal ohne Corner Reflektor. Im direkten Vergleich ist zu erkennen, dass der Corner Reflektor eindeutig als Ziel in 100 m Entfernung erkennbar ist. Auch andere Strukturen wie beispielsweise die Waldfläche im Hintergrund sind im Radarecho eindeutig abgebildet. Dies unterstreicht die Leistungsfähigkeit des Radarsystems. Die Problematik bei der Evaluierung der Leistungsfähigkeit des Radarsystems besteht vielmehr darin, ein geeignetes Messumfeld mit möglichst viel Freifläche und wenigen Hindernissen zu finden, damit bewusst platzierte Radarziele nicht im Radarecho großer Strukturen untergehen.

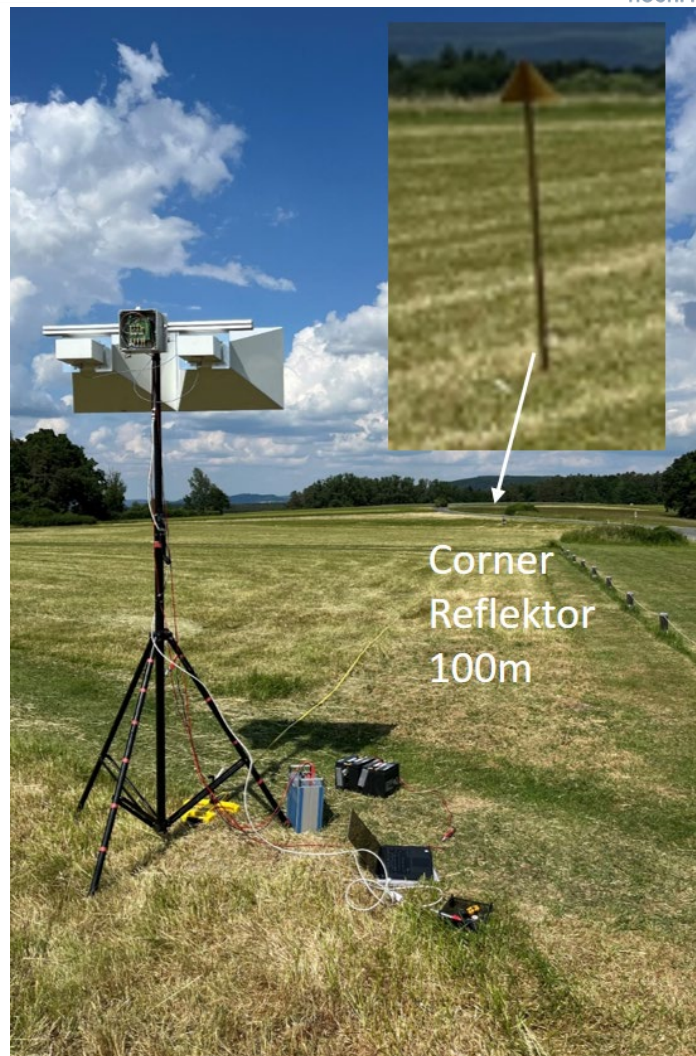


Abbildung 22: Messaufbau des Radarsystems im Freifeld, aufgenommen auf dem Flugplatz in Marloffstein, Erlangen-Höchststadt

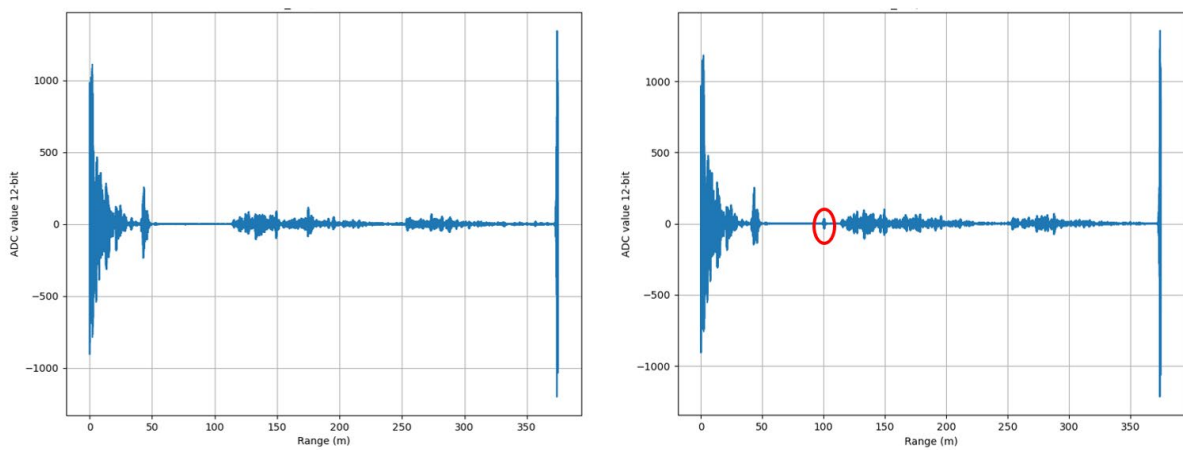


Abbildung 23: Radarecho ohne Corner Reflektor (links), Radarecho mit Corner Reflektor in 100m Entfernung (rechts)

4.3.2. Feldtest Langenferner 2021

Der erste Feldtest im Vorhaben fand im Juli/August 2021 am Langenferner in Südtirol, Italien statt. Dieser wurde primär aufgrund von Vorerfahrungen der RWTH Aachen ausgewählt. Unterkunft während des Feldtests war die Rifugio Casati, welche sich auf 3269 m ü.N.N. befindet. Einer der größten Vorteile ist hierbei der direkte Zugang zum Gletscher und die Bewirtschaftung der Hütte. Persönliches Gepäck und kleineres Material kann von der Forni Hütte aus bequem mit der Materialseilbahn transportiert werden. Sperriges Material wurde vom Tal per Helikopter direkt an in den Bereich des geplanten Feldtestcamps auf den Gletscher geflogen. Eine Luftaufnahme des Camps und der Unterkunft im Hintergrund ist in Abbildung 24 gezeigt. Im Bereich des Camps konnte eine durchgehende Schneedecke mit einer Dicke von ca. 2 m festgestellt werden. Da der Langenferner im Sommer i.d.R. komplett ausapert, ist direkt unter der Schneedecke der Beginn des eigentlichen Gletschereises.

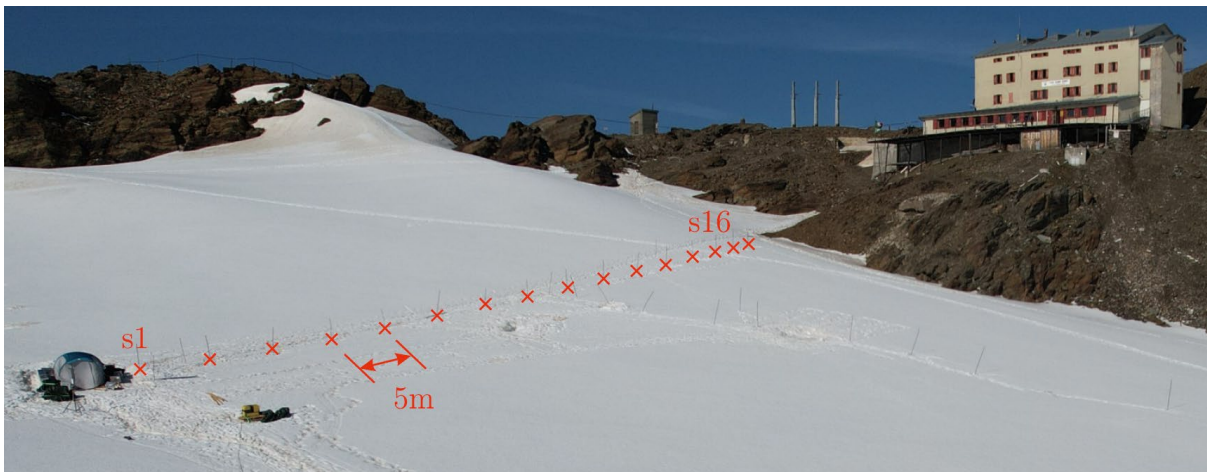


Abbildung 24: Drohnenaufnahme des Feldcamps und der Unterkunft am Langenferner 2021. Die roten Markierungen zeigen die einzelnen Radar-Messpunkte.

Der Feldtest dauert insgesamt ca. 2 Wochen zwischen der Anreise am 27.07.2021 und der Abreise am 11.08.2021. Hauptzielsetzung des LHFT bei diesem Feldtest war die Erprobung eines ersten Prototypen eines Sequential-Sampling Impulsradars, welches in Abbildung 25 gezeigt ist. Da zu dem Zeitpunkt des Feldtests noch kein vollständig in den FRS-Demonstrator integriertes Radarsystem bestand, wurden die Messungen, wie in Abbildung 25 gezeigt, mit für Luft angepasste Vivaldi-Antennen durchgeführt. Das Radarsystem wurde in einem spritzwassergeschützten Gehäuse untergebracht und auf einem Dreibein montiert. Als Stromversorgung diente ein mobiler 12 V Akku. Steuerung und Datenaufnahme des Radars erfolgte mit einem Toughbook.

Für die Evaluation des Radars wurden insgesamt 16 Messungen entlang einer Geraden im Abstand von 5 m aufgenommen, wie in Abbildung 24 gezeigt. Gleichzeitig wurde als Referenz mit einem kommerziellen Ground Penetrating Radar (GPR), welches mit 200 MHz arbeitet, ein B-Scan entlang der Messpunkte 1 bis 16 aufgenommen, siehe Abbildung 26. Zum einen ist der Verlauf des Gletscherbodens im Bereich von 10m (Position 16) bis knapp über 50 m (Position 1) zu erkennen. Weiterhin ist sehr deutlich eine Anomalie in 7-8 m Tiefe an der Position der senkrechten grünen Linie zu erkennen. Ob es sich hierbei um eine Gletscherspalte handelt, konnte nicht verifiziert werden. Die weißen senkrechten Streifen im Bild sind Störungen und können vernachlässigt werden. Aus dem in Abbildung 26 gezeigten

B-Scan des kommerziellen Radars wurde die Gletscherdicke an den jeweiligen Messpositionen 1 bis 16 bestimmt. Eine Übersicht ist in Tabelle 3 gegeben.



Abbildung 25: Messaufbau des Prototyp-Sequential-Sampling Impulsradars mit Vivaldi Antennen

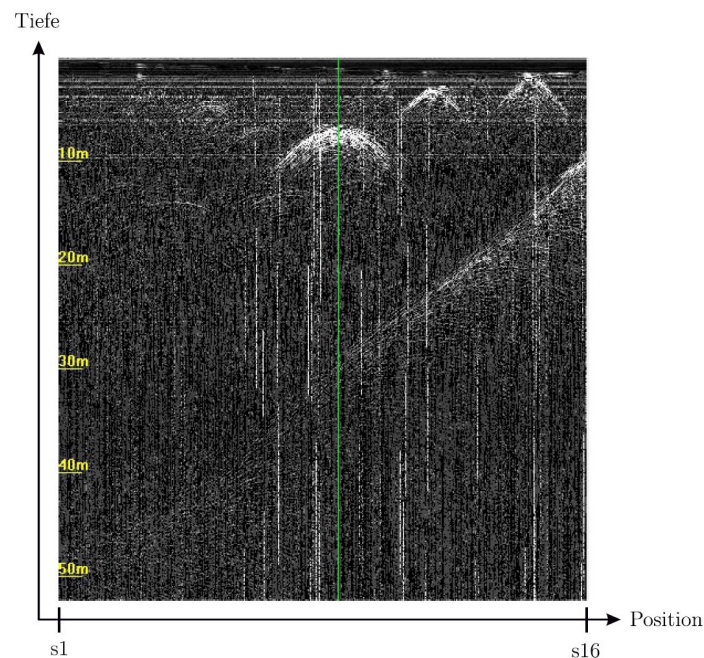


Abbildung 26: B-Scan eines kommerziellen GPR entlang der Messpunkte s1 bis s16. Die grüne Linie markiert die Position einer Anomalie im Eis.

Tabelle 3: Mit dem kommerziellen GPR bestimmte Gletscherdicken bei den Positionen s1 bis s16

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Tiefe / m	53	48	44,5	42	39	36	34	30	27	25	22,5	20,5	18	15	12,5	10

Zunächst wurde das Dreibein mit dem Radar direkt oberhalb der Anomalie im Eis platziert und eine Messung durchgeführt. Der dazugehörige A-Scan ist in Abbildung 27 gezeigt. Das Übersprechen der Antennen dient dabei als Referenz und markiert den Entfernungsnulldpunkt.

Der Peak bei ca. 7-8 m korrespondiert dabei mit der Anomalie im Eis, die auch im B-Scan des kommerziellen Radars sichtbar ist, vgl. Abbildung 26. Ein weiterer Peak bei ca. 30 m resultiert aus einer Reflexion aus dem Gletscherboden, was ebenfalls mit der Messung mit dem kommerziellen GPR übereinstimmt.

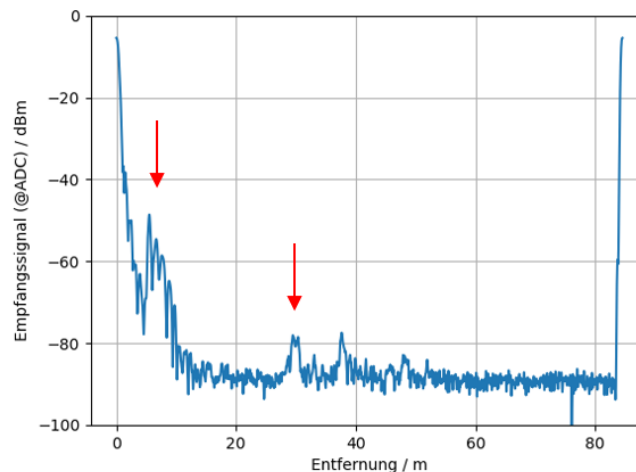


Abbildung 27: A-Scan, aufgenommen mit dem Radar direkt oberhalb der Anomalie im Eis.

Als nächstes wurde die komplette Messreihe an den Positionen 1 bis 16 aufgenommen, dargestellt in Abbildung 28. Die roten Pfeile markieren hierbei jeweils die Position im A-Scan an welcher der Gletscherboden zu erwarten ist, basierend auf Tabelle 3. Bei einer Eisdicke < 30 m kann der Gletscherboden eindeutig einem im Radarbild korrespondierenden Peak zugeordnet werden, wohingegen bei zunehmender Entfernung die Empfangsleistung abnimmt und somit die Bodenreflexion teilweise im Rauschen untergeht. Die vergleichsweise hohen Peaks bei höheren Tiefen resultieren aus Reflexionen oberhalb des Eises wie beispielsweise Felsformationen oder die Berghütte. Dies ist auf die große Abstrahlcharakteristik der Vivaldi-Antennen zurückzuführen. Insgesamt waren die Messungen auf dem Langenferner für die Radarmessungen nicht ideal, da es mit Tageshöchstwerten deutlich über 0°C deutlich zu warm war. Die Folge war ein Aufschmelzen der oberen Schneedecke, was wiederum zu einer starken Dämpfung des Radarsignals bei der verwendeten Mittenfrequenz von 1,35 GHz führte.

Mit den eben gezeigten Messungen konnte die Funktionsfähigkeit des verwendeten Radarsystems gezeigt werden. Es konnten sowohl der Gletscherboden, als auch eine Anomalie im Eis erfolgreich detektiert werden. Die Performance des Systems ist dabei in einem so frühen Entwicklungsstadium auf dem gleichen Level wie eine kommerzielles GPR, welches mit einer deutlich geringeren Mittenfrequenz arbeitet. Dies unterstreicht die Leistungsfähigkeit des gewählten Radarkonzepts.

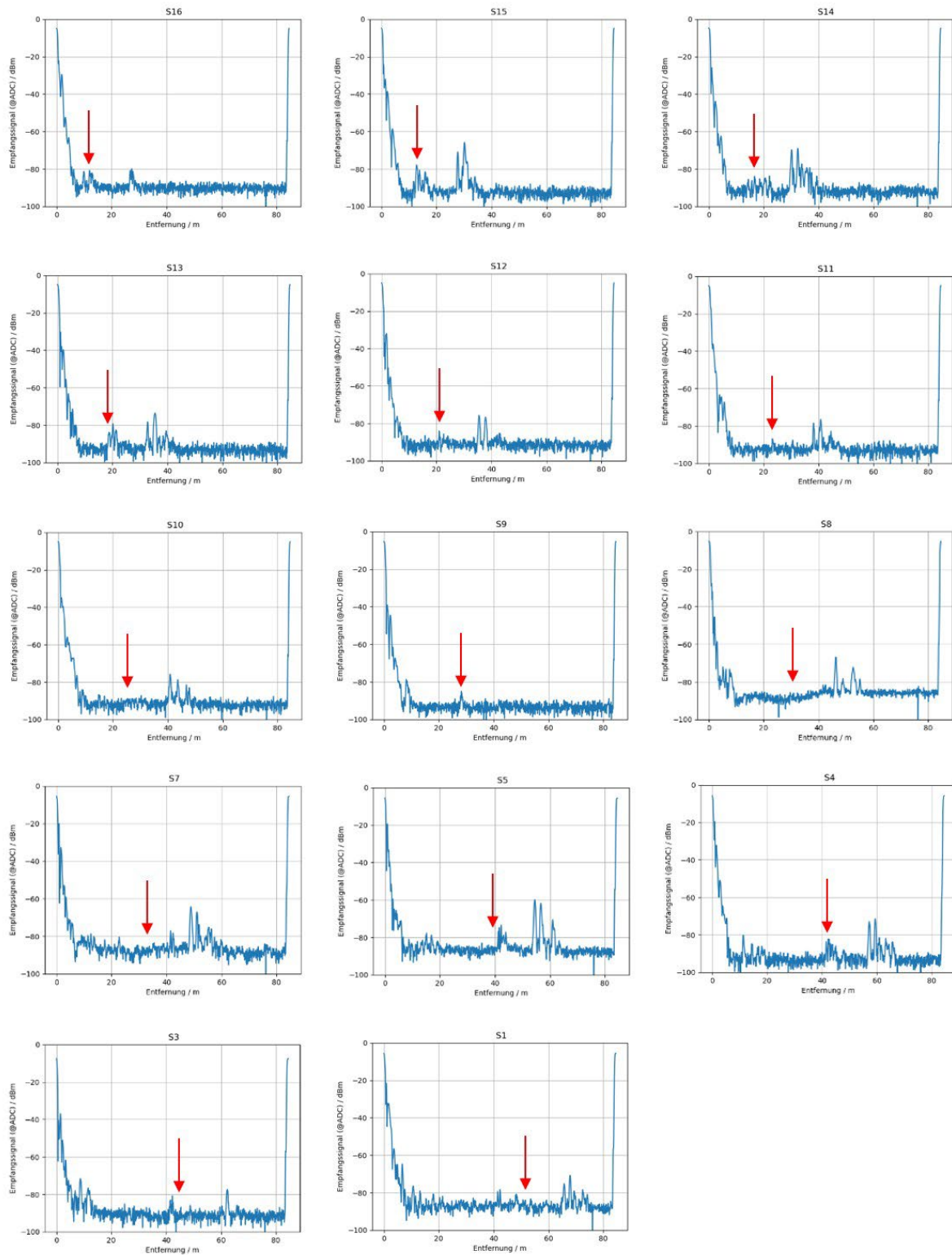


Abbildung 28: A-Scans der mit dem Radar aufgenommenen Messungen an den Positionen s1 bis s16. Die Messungen s6 und s2 fehlen und sind deshalb nicht gezeigt. Der rote Pfeil markiert jeweils die zu erwartende Gletscherdicke basierend auf den Messungen mit dem kommerziellen GPR.

4.3.3. Feldtest Langenferner 2022

Der zweite Feldtest fand analog zum ersten Feldtest auf dem Langenferner in Südtirol, Italien statt. Der Test wurde zusammen mit dem Team von TRIPLE-IceCraft durchgeführt, wobei Synergien in den Bereichen Logistik, Transport und gegenseitige Unterstützung bei den Feldversuchen genutzt werden konnten. Eine Luftaufnahme des Camps ist in Abbildung 29 gezeigt. Der Feldtest dauerte insgesamt ca. 2 Wochen zwischen der Anreise am 19.06.2022 und der Abreise am 01.07.2022. Wie auch beim ersten Feldtest erfolgte der Transport des Materials mit dem Helikopter bzw. der Materialeiseilbahn.



Abbildung 29: Drohnenaufnahme des Feldcamps auf dem Langenferner 2022

Da wie beim ersten Feldtest noch kein vollständig in den FRS-Schmelzsondendemonstrator integriertes Radarsystem vorlag, wurden die Messungen analog zu den Messungen am ersten Feldtest durchgeführt. Abbildung 31 zeigt den Messaufbau des Radarsystems mit Vivaldi-Antennen, welches auf einem Dreibein montiert ist. An der Spitze des Dreibeins ist ein RTK-Empfänger zur Bestimmung der Koordinaten während den Messungen, angebracht. Als Stromversorgung diente erneut eine 12 V Batterie. Die Steuerung und Datenaufnahme erfolgte wieder mit einem Toughbook.

Analog zum ersten Feldtest wurden zunächst Radarmessungen mit einem kommerziellen GPR gemacht, um einen interessanten Messort ausfindig zu machen. Anschließend wurden Radarmessungen mit dem in FRS entwickelten Radar entlang einer Geraden im Abstand von 3m durchgeführt. Eine Übersicht der Messpunkte ist in Abbildung 30 gezeigt. Abbildung 32 zeigt einen Vergleich der Radarmessungen mit dem kommerziellen GPR und dem in FRS entwickelten Radar, wobei mehrere A-Scans zu einem B-Scan zusammengesetzt wurden. Alle Einzelmessungen wurden mit einer M-Sequenzlänge von 8191 durchgeführt, was einer theoretischen Rauschunterdrückung von ca. 39 dB entspricht. Es ist eine deutliche Übereinstimmung des Gletscherverlaufs in beiden B-Scans zu erkennen. Auch die Anomalie bei ca. 8 m Tiefe ist eindeutig erkennbar. Bei ca. 42 m ist ein durch die Hardware

hervorgerufenes Geisterziel zu sehen, das vernachlässigt werden kann. Abbildung 33 zeigt einen A-Scan, der direkt oberhalb einer Anomalie im Eis aufgenommen wurde, vgl. Abbildung 32. Die Reflexion ist sehr deutlich im Radarsignal erkennbar.



Abbildung 30: Messpunkte der Radarmessungen überlagert mit einem Luftbild (Quelle: GoogleEarth)



Abbildung 31: Messaufbau des Radarsystems montiert auf einem Dreibein

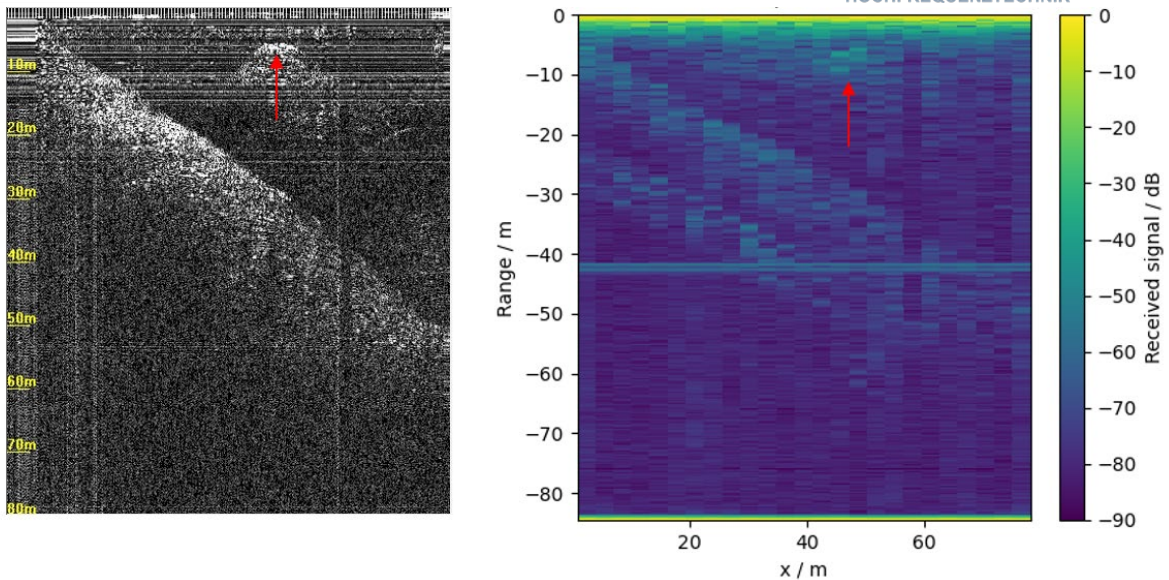


Abbildung 32: B-Scan des kommerziellen GPR (links) vs. B-Scan (zusammengesetzt aus mehreren A-Scans) des in FRS entwickelten Radarsystems (rechts). Der rote Pfeil markiert jeweils eine Anomalie im Eis.

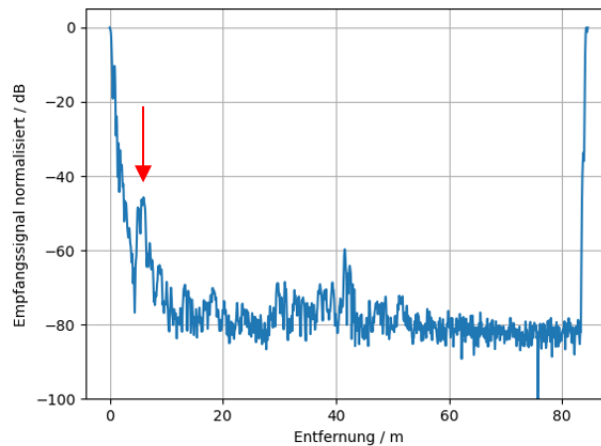


Abbildung 33: A-Scan mit dem in FRS entwickelten Radarsystem direkt oberhalb der Anomalie im Eis

4.3.4. Feldtest Aletschgletscher 2023

Der letzte Feldtest in dem Vorhaben fand im März/April 2023 statt. Dies stellte insbesondere für den anvisierten Zeitraum eine Herausforderung dar, da viele Hütten in den Alpen (inklusive der Hütte am Langenferner) zu diesem Zeitpunkt geschlossen waren. Daher wurde sich für den Aletschgletscher in der Schweiz entschieden. Der flächenmäßig größte und längste Gletscher der Alpen befindet sich im Schweizer Kanton Wallis und ist zumindest in seinem Nährgebiet sehr gut erschlossen. Für Forscher besteht die Möglichkeit, auf der Forschungsstation am Jungfraujoch auf 3450 m ü.N.N. zu arbeiten und zu übernachten. Von dort kann man in wenigen Gehminuten durch ein Tunnelsystem auf den Jungfraufirn, einer der Zuflüsse des Aletschgletschers, gelangen. Die Anfahrt gestaltet sich ebenfalls sehr einfach, da das Jungfraujoch von Grindelwald aus mit der Bahn erreichbar ist. So können im Vergleich zu anderen potenziellen Feldtestgletschern Kosten für Helikopter etc. eingespart werden.



Abbildung 34: Aufnahme der Snowfarm und des Camps auf dem Aletschgletscher 2023, aufgenommen direkt am Ausgang des Tunnels zur Forschungsstation.

Der Feldtest startete am 27.03.2023 und endete am 14.04.2023. Im gesamten Zeitraum war ein Team der FAU vor Ort und führte Messungen mit dem vollständig integrierten FRS-Schmelzsondendemonstrator durch. Abbildung 35 zeigt eine Drohnenaufnahme des Camps auf dem Aletschgletscher. Der FRS-Schmelzsondendemonstrator vor dem Einschmelzen ist in Abbildung 36 zu sehen.



Abbildung 35: Drohnenaufnahme des Camps auf dem Aletschgletscher 2023



Abbildung 36: FRS-Schmelzsondendemonstrator vor dem Einschmelzvorgang auf dem Aletschgletscher 2023

Es konnte gezeigt werden, dass die Schmelzfähigkeit mit dem neuen Schmelzkopfdesign und den integrierten Keramik-Antennen erhalten blieb. Abbildung 37 zeigt die manuell gemessene Schmelzgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Tiefe der Schmelzsonde für eine Tiefe von ca. 6-11 m. Hierfür wurden Markierungen alle 0,5 m am Seil der Schmelzsonde angebracht und jeweils die Zeit bis zum Erreichen der nächsten Markierung gestoppt. Die mittlere Schmelzgeschwindigkeit beträgt rund 1,25 m/h. Die Geschwindigkeit unterliegt Schwankungen, da während des Schmelzvorgangs kontinuierlich manuell Seil nachgeführt werden muss, damit die Sonde Kontakt zum Eis hat und nicht in der Luft hängt. Weiterhin wurde der Schmelzvorgang der Sonde aufgrund mehrerer Dreckschichten, wie z.B. der Sahara-Staubschicht, siehe Abbildung 40, beeinträchtigt, da sich der Dreck vor dem Schmelzkopf sammelte und die Wärmeabgabe des Kopfs in das Eis behinderte.

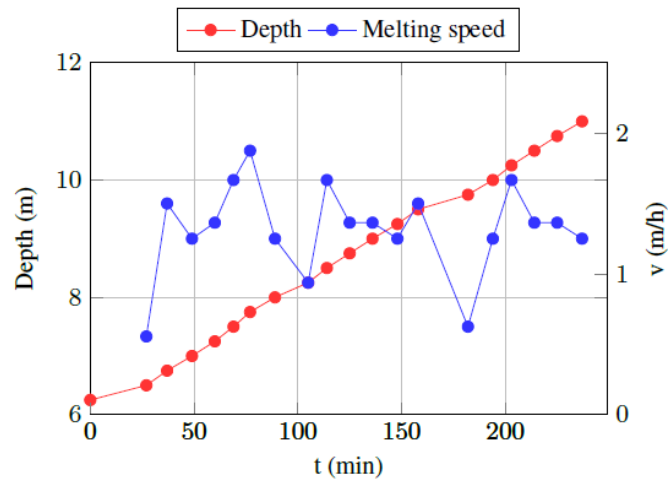


Abbildung 37: Schmelzgeschwindigkeit im Vergleich zur Tiefe

Weiterhin wurden während des Schmelzvorgangs kontinuierlich Radarmessungen aufgenommen. Abbildung 38 zeigt einen B-Scan der während des Einschmelzens von 0,3 m bis 3,7 m Tiefe. Neben dem starken Übersprechen der Antennen, welche als Referenz für die Entfernung dient, sind einzelne Strukturen im Radarbild zu erkennen, welche sich beim Einschmelzen auf das Radar zubewegen, vgl. rot gestrichelte Linien. Da wie eben bereits erwähnt die Schmelzgeschwindigkeit nicht konstant war, ist entsprechend auch die x-Achse im Radarbild nichtlinear. Abbildung 39 zeigt den zu Sample 95 gehörenden A-Scan, wobei neben dem starken Übersprechen der Antennen die dominanten Rückstreuer zu erkennen sind.

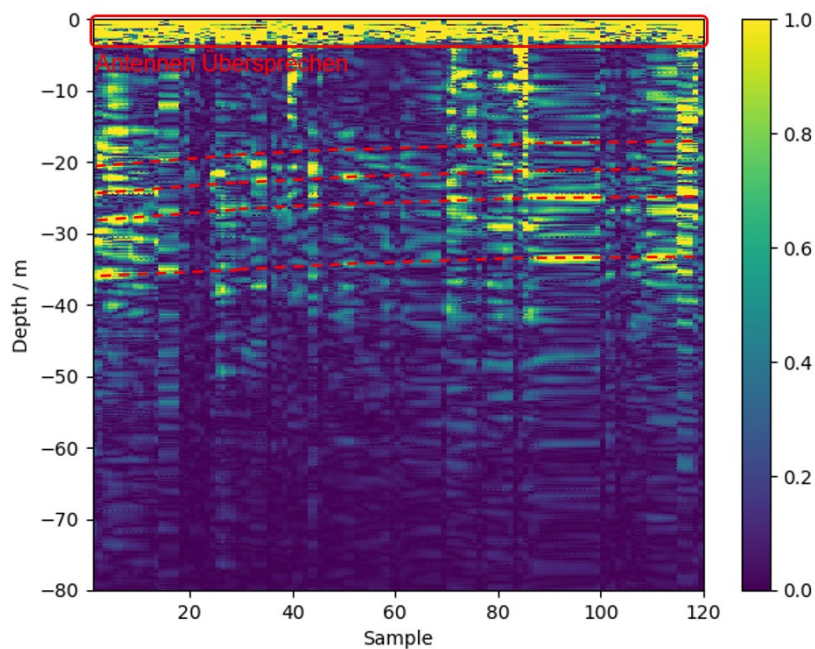


Abbildung 38: B-Scan, zusammengesetzt aus mehreren A-Scans während des Schmelzvorgangs von 0,3 m bis 3,7 m Tiefe

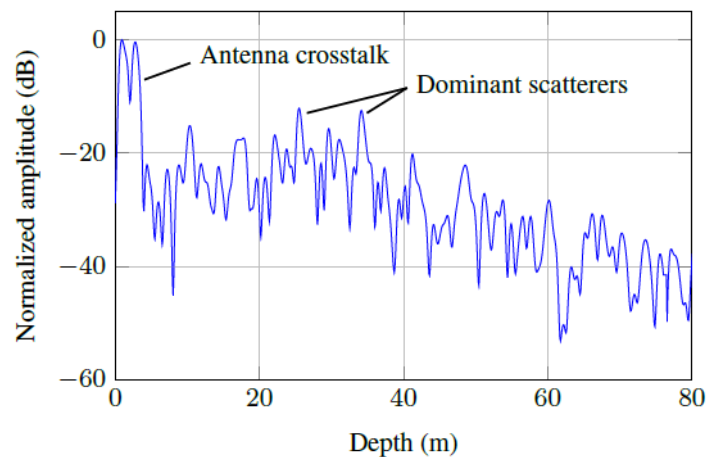


Abbildung 39: A-Scan, korrespondierend zu Sample 95 im B-Scan in Abbildung 38

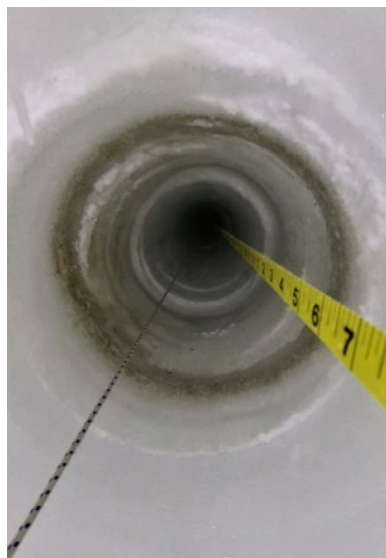


Abbildung 40: Dreckschichten im Bohrloch

5. Verwertung

Im Rahmen des Vorhabens wurden insgesamt 7 Abschlussarbeiten (3 Bachelorarbeiten und 4 Masterarbeiten) angefertigt, was das große Interesse der Studierenden an der Thematik unter Beweis stellt. Zusätzlich hat das Vorhaben Bezug zu den Promotionsvorhaben von Michael Stelzig und Niklas Haberberger und bildet die Grundlage für die Vorbereitung der Promotionsverfahren für Lena Krabbe und Max Heidbrink. Weiterhin ist ein Imagevideo mit Bezug zum Vorhaben TRIPLE-FRS entstanden. Insgesamt sind 11 Veröffentlichungen [22-32] auf internationalen Konferenzen bzw. Journals aus den Bereichen Radartechnik, Geowissenschaften und planetare Exploration aus dem Vorhaben heraus entstanden, wobei weitere Publikation mit Bezug zu TRIPLE-FRS geplant sind.

Zusätzlich fließen viele Erkenntnisse aus TRIPLE-FRS in das Folgeprojekt TRIPLE-FRS-2 ein bzw. bilden die Grundlage hierfür. Zusätzlich forscht der LHFT basierend auf den Erfahrungen aus TRIPLE-FRS im Graduiertenkolleg M3OCCA, getragen vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst. Durch die rege Teilnahme an den

Synergietreffen der DLR Explorer-Initiativen konnte außerdem die Mitarbeit des LHFTs am weiteren Verlauf der VaMEx Projektklinie sichergestellt werden. Der LHFT ist hierbei ein Vorhabenspartner im Projekt VaMEx-RGE (Valles Marineris Explorer - Robust Ground Exploration), ebenfalls gefördert vom DLR. Als weiteres Forschungsvorhaben mit Beteiligung der FAU Erlangen ist das Vorhaben EnEx-RaTNOS (Radartransponder basierte Navigation und Orbitbestimmung von Satelliten) zu nennen.

Literaturverzeichnis

- [1] Christopher F Chyba and Cynthia B Phillips. Possible ecosystems and the search for life on europa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(3):801–804, 2001.
- [2] Kevin P Hand, Christopher F Chyba, John C Priscu, Robert W Carlson, and Kenneth H Nealson. Astrobiology and the potential for life on europa. *Europa*, pages 589–629, 2009.
- [3] Julia Kowalski, Marc S Boxberg, Jan Thimo Grundmann, Jean-Pierre Paul de Vera, Dirk Heinen, and Oliver Funke. The triple project–towards technology solutions for life detection missions. Technical report, Copernicus Meetings, 2023
- [4] Maximilian Nitsch, David Stenger, and Dirk Abel. Automated tuning of nonlinear kalman filters for optimal trajectory tracking performance of auvs. *arXiv preprint arXiv:2304.03565*, 2023.
- [5] M. G. Aartsen et al. The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and Online Systems. *JINST*, 12(03):P03012, 2017.
- [6] Yasser Abdou, K-H Becker, Jens Berdermann, Martin Bissok, Christian Bohm, Sebastian Boeser, Martin Bothe, Michael Carson, Freija Descamps, J-H Fischer-Wolfarth, et al. Design and performance of the south pole acoustic test setup. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 683:78–90, 2012
- [7] Julia Kowalski, Peter Linder, S Zierke, B von Wulfen, J Clemens, K Konstantinidis, G Ameres, R Hoffmann, J Mikucki, S Tulaczyk, et al. Navigation technology for exploration of glacier ice with maneuverable melting probes. *Cold Regions Science and Technology*, 123:53–70, 2016
- [8] Dirk Heinen, Dmitry Eliseev, Christoph Henke, Sabina Jeschke, Peter Linder, Sebastian Reuter, Sebastian Schönitz, Franziska Scholz, Lars Steffen Weinstock, Stefan Wickmann, et al. EnEx-RANGE – Robust autonomous Acoustic Navigation in Glacial ice. In *EPJ Web of Conferences*, volume 135, page 06007. EDP Sciences, 2017
- [9] Lars Steffen Weinstock, Simon Zierke, Dmitry Eliseev, Peter Linder, Cornelius Vollbrecht, Dirk Heinen, and Christopher Wiebusch. The autonomous pinger unit of the

acoustic navigation network in enex-range: an autonomous in-ice melting probe with acoustic instrumentation. *Annals of Glaciology*, 62(84):89–98, 2021.

- [10] Michael Stelzig, Andreas Benedikter, Ralf Horn, Marc Jager, Martin Keller, Rolf Scheiber, Gerhard Krieger, and Martin Vossiek. Virtual synthetic aperture radar target based on a miniaturized monostatic digital delay transponder. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 32(3):249–252, 2022
- [11] Michael Stelzig, Andreas Benedikter, Micha Kleinlein, Niklas Haberberger, Lena Krabbe, Konstantin Lomakin, Matthias Braun, Gerhard Krieger, and Martin Vossiek. A drone-based 0.7-4.7 ghz fmcw radar system for high-resolution exploration of subsurface glacier structures. accepted at the IEEE International Radar Conference, Sydney, 2023.
- [12] Jan Auffenberg. On a prototype detector for the radio emission from air showers at the South Pole. PhD thesis, Wuppertal, Univ., Diss., 2010, 2010
- [13] K Helbing, Ruth Hoffmann, U Naumann, D Eliseev, D Heinen, F Scholz, C Wiebusch, and S Zierke. Acoustic properties of glacial ice for neutrino detection and the enceladus explorer. arXiv preprint arXiv:1608.04971 , 2016.
- [14] Alexander Kyriacou, Gianluca Boccarella, Pia Friend, and Klaus Helbing. Simulating radiopropagation in ice with parabolic equations: applications to terrestrial glaciers and icemoons. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pages EGU22–560, 2022.
- [15] <https://www.wolfspeed.com/products/rf/>
- [16] <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/gan-on-sic-or-gan-on-si/>
- [17] J. C. Pedro, L. C. Nunes and P. M. Cabral, "Soft compression and the origins of nonlinear behavior of GaN HEMTs," *2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference*, Rome, Italy, 2014, pp. 353-356, doi: 10.1109/EuMIC.2014.6997865
- [18] H. Sarbishaei, D. Y. -T. Wu and S. Boumaiza, "Linearity of GaN HEMT RF power amplifiers - a circuit perspective," *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259553
- [19] S. A. Albahrani and A. E. Parker, "Characterization of trapping and thermal dispersion in GaN HEMTs," *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Anaheim, CA, USA, 2010, pp. 413-416, doi: 10.1109/MWSYM.2010.5515028
- [20] J. P. Jones *et al.*, "Electro-thermo-mechanical transient modeling of stress development in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs)," *Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, Orlando, FL, USA, 2014, pp. 959-965, doi: 10.1109/ITHERM.2014.6892385

- [21] C. Berrached, D. Bouw, M. Camiade and D. Barataud, "Wideband high efficiency high power GaN amplifiers using MIC and Quasi-MMIC technologies," *2013 European Microwave Conference*, Nuremberg, Germany, 2013, pp. 1395-1398, doi: 10.23919/EuMC.2013.6686927
- [22] Stelzig, M., Audehm, J., Burgman, B., Becker, F., Deriks, L., Espe, C., Feldmann, M., Francke, G., Friend, P., Haberberger, N., Heinen, D., Nghe, C. T., Schickendanz, L., Zierke, S., Wiebusch, C., Helbing, K., Böck, G., and Vossiek, M.: Melting and forefield reconnaissance technologies within TRIPLE - accessing subglacial water reservoirs for future missions to Ocean Worlds, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15333, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15333>
- [23] Boxberg, Marc & Audehm, Jan & Becker, Fabian & Boledi, Leonardo & Burgmann, Ben & Chen, Qian & Friend, Pia & Haberberger, Niklas & Heinen, Dirk & Nghe, Chi & Simson, Anna & Stelzig, Michael & Kowalski, Julia. (2021). TRIPLE – Ice Data Hub, Model-based Mission Support and Forefield Reconnaissance System. 10.23689/fidgeo-3968.
- [24] D. Heinen *et al.*, "The TRIPLE Melting Probe - an Electro-Thermal Drill with a Forefield Reconnaissance System to Access Subglacial Lakes and Oceans," *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, San Diego, CA, USA, 2021, pp. 1-7, doi: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705999
- [25] J. Audehm, F. Becker, B. Burgmann, P. Friend, N. Haberberger, D. Heinen, C. T. Nghe, M. Stelzig: TRIPLE-FRS – A Forefield Reconnaissance System for Melting Probes to Explore Icy Worlds, IPPW, 2021, Online
- [26] A. Grathwohl, M. Stelzig, J. Kanz, P. Fenske, A. Benedikter, C. Knill, I. Ullmann, I. Hajnsek, A. Moreira, G. Krieger, M. Vossiek and C. Waldschmidt, "Taking a Look Beneath the Surface: Multicopter UAV-Based Ground-Penetrating Imaging Radars", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 23, pp. 32-46, September, 2022
- [27] Becker, F., Stelzig, M., Audehm, J., Haberberger, N., Heinen, D., Zierke, S., Helbing, K., Wiebusch, C., Vossiek, M., and Böck, G.: Hybrid concept for a forefield reconnaissance system for melting probes capable of moving through terrestrial and extraterrestrial cryospheres, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-14989, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14989>
- [28] M. Vossiek, N. Haberberger, L. Krabbe, M. Hehn, C. Carlowitz and M. Stelzig, "A Tutorial on the Sequential Sampling Impulse Radar Concept and Selected Applications," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 3, no. 1, pp. 523-539, Jan. 2023, doi: 10.1109/JMW.2022.3228724
- [29] N. Haberberger, M. Stelzig, J. Audehm, F. Becker, M. G. Do, D. Heinen, S. Zierke, C. Wiebusch, K. Helbing, G. Böck, M. Vossiek: TRIPLE-FRS: A Hybrid In-Ice Forefield Reconnaissance System for Melting Probes, IPPW 2023, Marseille, France

- [30] M. Stelzig *et al.*, "Experimental Verification of a Digital Delay Transponder Used as an In-Ice Synthetic Aperture Radar Reference Target," *2023 53rd European Microwave Conference (EuMC)*, Berlin, Germany, 2023, pp. 1020-1023, doi: 10.23919/EuMC58039.2023.10290249
- [31] M. Stelzig, A. Benedikter, M. Kleinlein, N. Haberberger, L. Krabbe, K. Lomakin, M. Braun, G. Krieger, M. Vossiek: A Drone-Based 0.7-4.7 GHz FMCW Radar System for High-Resolution Exploration of Subsurface Glacier Structures, *International Radar Conference*, 2023
- [32] M. Stelzig *et al.*: A Radar and Sonar-Based Hybrid Forefield Reconnaissance System for Melting Probes for Englacial Exploration, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems (Eingereicht)*