

# Akustisches Vorfelderkundungssystem

## für die Navigation von Schmelzsonden in Eis

Mia Giang Do, Jan Audehm, Dirk Heinen, Christopher Wiebusch, Simon Zierke

Für die Suche nach extraterrestrischem Leben im Sonnensystem ist Jupiters Eismond Europa ein interessanter Kandidat. Unter dem kilometerdicken Eispanzer des Mondes könnte sich ein globaler Ozean befinden. Eine zukünftige Mission zur Erkundung des Wasserreservoirs erfordert das Durchdringen der massiven Eishülle. Im Rahmen der TRIPLE-Projektlinie werden Technologien für eine derartige Mission entwickelt und ihre Einsatzfähigkeit in einem terrestrischen Feldtest erprobt. Als Transportmittel für wissenschaftliche Nutzlasten kommt dabei eine elektrothermische Sonde zum Einsatz. Für den Erfolg der Mission ist es zwingend erforderlich, dass die Schmelzsonde Hindernisse auf ihrer Flugbahn erkennt und effektiv zur Eis-Wasser-Grenzfläche navigiert. Im Rahmen des Teilprojekts TRIPLE-FRS wird die Entwicklung eines hybriden Vorfelderkundungssystems behandelt, das sowohl Sonar als auch Radar umfasst. Für Systemvalidierungen im Wasser und in Gletschern wurde eine Schmelzsonde als Trägersystem für das gesamte Vorfelderkundungssystem verwendet. Die Fähigkeit des Sonars, verschiedene Signalformen zu senden und zu empfangen, wurde in einem Wassertest demonstriert. Dabei diente der Schmelzkopf der Sonde als Schallwandler, wobei sowohl die Signalgenerierung als auch der Signalempfang mit der entwickelten Elektronik realisiert wurden.

### Einleitung

Die Erforschung von subglazialen Wasserreservoirs ist für eine zukünftige Raumfahrtmission auf der Suche nach extraterrestrischem Leben von großer Bedeutung. Aus bisherigen Beobachtungen ging Jupiters Eismond Europa neben dem Saturnmond Enceladus als ein vielversprechender Kandidat in unserem Sonnensystem hervor, der unter seiner mächtigen Eishülle einen globalen Ozean verbergen kann. Der Großteil unseres Wissens über Europa stammt aus der Galileo-Mission (1989–2003). Basierend darauf wurden verschiedene Modelle für die Eisdicke auf Europa entwickelt. Die Schätzungen der Dicke reichen von etwa 10 km bis 47 km [1, 2].

Die nächste Etappe in der Erforschung von Europa besteht aus der Erforschung seiner Oberfläche durch

### Acoustic Forefield Reconnaissance System for the Navigation of Melting Probes in Ice

In search of extraterrestrial life within the solar system, Jupiter's moon Europa emerges as a promising candidate. Beneath the kilometer-thick ice shell of the moon, there could be a global ocean. A future mission aimed at exploring this water reservoir requires the penetration of its massive ice shell. Within the TRIPLE-projectline, technologies for such a mission are developed and their operational capability is tested in a terrestrial field test. An electrothermal probe is utilized as the transportation system for scientific payloads. For the success of the mission, it is mandatory for the melting probe to detect obstacles on its trajectory and effectively navigate to the ice-water interface. The development of a hybrid forefield reconnaissance system, comprising both sonar and radar, is executed in the subproject TRIPLE-FRS. For system validations in water and in glaciers, a melting probe was used as the carrier system for the entire forefield reconnaissance system. The ability of the sonar to transmit and receive different signal forms was demonstrated in a water test. In this process, the melting head of the probe served as a sound transducer, with both signal generation and signal reception implemented using the developed electronics.

Flyby-Missionen von Satelliten. Dazu startete im April 2023 die Mission JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) der ESA [3]. Der Start der von der NASA durchgeführten Mission Europa Clipper [4] ist für 2024 geplant.

Die endgültige Beantwortung der Frage zur Habitabilität von Europa benötigt eine Lander-Mission auf der Oberfläche des Mondes.

Für die Durchdringung der massiven Eisschicht und den Transport von wissenschaftlichen Nutzlasten zum Wasserreservoir ist eine elektrothermische Sonde eine effiziente Lösung [5]. Damit die Sonde imstande ist, ungehindert bis zur Eis-Wasser-Grenzschicht zu gelangen und sich dort zu verankern, muss sie mögliche Hindernisse in ihrer Trajektorie und den Phasenübergang zwischen Eispanzer und subglazi-

alem Gewässer frühzeitig detektieren können. Dazu wird ein leistungsfähiges Vorfelderkundungssystem benötigt. Die Entwicklung und Erprobung von Schlüsseltechnologien, insbesondere einer Schmelzsonde und des zugehörigen Vorfelderkundungssystems für eine zukünftige Exploration von subglazialen Seen wird innerhalb der TRIPLE-Projektlinie (engl. Abk. für Technologies for Rapid Ice Penetration and Subglacial Lake Exploration) durchgeführt.

Dieser Artikel gibt zunächst einen Überblick über die TRIPLE-Mission und stellt das innerhalb von TRIPLE-FRS entwickelte Vorfelderkundungssystem vor. Dabei wird der Fokus auf dem akustischen Vorfelderkundungssystem liegen. Nach der Definition der Anforderungen für den Einsatz in einer Schmelzsonde werden das Design des Sonars und Ergebnisse einer Testkampagne zur Systemvalidierung in Wasser vorgestellt.

### Die TRIPLE-Mission

Mit dem Ziel, Konzepte und Technologien für eine künftige Raumfahrtmission zur Erforschung der Ozeane auf Eismonden in unserem Sonnensystem zu entwickeln, hat die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR die Projektlinie TRIPLE ins Leben gerufen [6]. Die Entwicklung umfasst drei Hauptkomponenten:

1. Ein schneller und rückführbarer elektrothermischer Bohrer (hier Schmelzsonde genannt) für die Durchdringung des Eispanzers und für die Untersuchung der Eisschicht
2. Ein miniaturisiertes autonomes Unterwasserfahrzeug für die Exploration des Wasserreservoirs und Probenentnahme
3. Ein astrobiologisches Labor zur in-situ-Untersuchung der Proben

Eine schematische Darstellung eines möglichen Missionsverlaufs ist in Abbildung 1 dargestellt. Zuerst durchdringt die Schmelzsonde den Eispanzer und transportiert das autonome Unterwasserfahrzeug zu der Eis-Wasser-Grenzschicht. Dort wird es die Sonde verlassen, das Wasserreservoir erkunden und ggf. Proben sammeln. Die Proben werden anschließend von einem astrobiologischen Labor analysiert. Die Realisierbarkeit der TRIPLE-Mission und ihrer Komponenten wird in einem terrestrischen analogen Szenario demonstriert.

Um die nachfolgenden Anforderungen an das Sonar-Vorfelderkundungssystem zu erläutern, liegt der Fokus hier besonders auf dem Entwicklungsstand der Schmelzsonde. In der ersten Entwicklungsstufe wurde ein Prototyp für die technische Machbarkeit – die TRIPLE-IceCraft-Schmelzsonde – entwickelt [7]. Eine Darstellung davon befindet sich in Abbildung 2. Sie ist ausgelegt für eine Schmelztiefe von mehreren hundert Metern und kann eine maximale Schmelz-

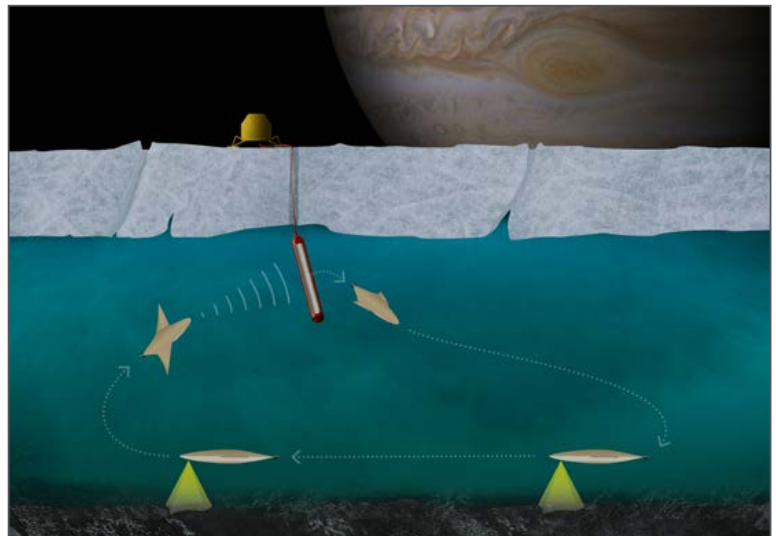
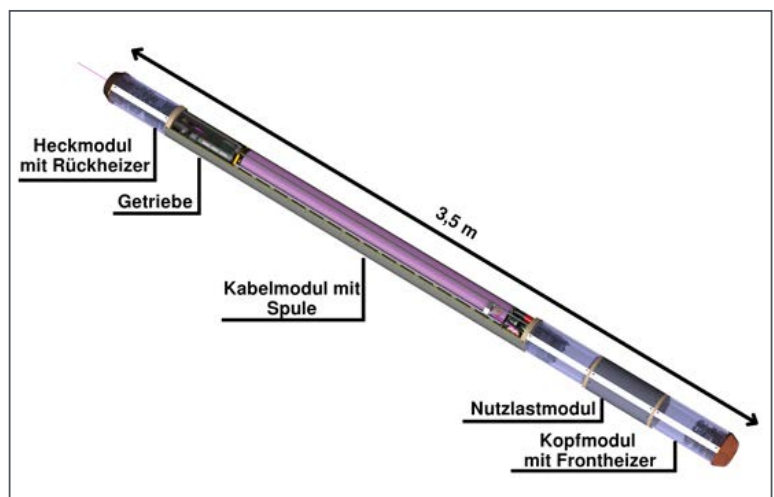


Abb. 1: Künstlerische Darstellung einer Lander-Expedition zu einem subglazialen See (Quelle: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen)

geschwindigkeit von 5 m/h erreichen. Die Sonde ist modular aufgebaut und hat einen Durchmesser von 0,2 m. Ihre Länge beträgt 3,5 m zzgl. Payload-Modulen mit einer typischen Länge von 1 m. Die Spannungsversorgung und Kommunikation mit der Sonde erfolgen über ein einziges Kabel, das über eine integrierte Spule im Inneren der Sonde abgewickelt wird. Damit kann die Sonde mithilfe des Front- bzw. des Rückheizers vorwärts und auch rückwärts aus einem zugefrorenen Eiskanal geführt werden. Die Funktionsfähigkeit der Sonde wurde im Februar 2023 im Rahmen eines Feldtests auf dem Ekström-Eisschelf in der Antarktis demonstriert [8].

An der Entwicklung aller Teilkomponenten von TRIPLE sind insgesamt mehr als 20 Projektpartner beteiligt. Mit aufeinander abgestimmten Schnitt-

Abb. 2: Darstellung der TRIPLE-IceCraft-Schmelzsonde. Die Sonde ist rückführbar und ausgelegt für eine Schmelzgeschwindigkeit von 5 m/h (Quelle: GSI GmbH, Aachen).



stellen ist es anschließend möglich, die Subsysteme zu einem TRIPLE-Gesamtsystem zu vereinen. Um die Funktionsfähigkeit der Technologien zu testen, wird eine terrestrisch-analoge Testkampagne in der Dome-C-Region in der Antarktis geplant.

Dome-C ist mit einer jährlichen mittleren Temperatur von  $-52^{\circ}\text{C}$ , gemessen in 3 m Höhe über der Oberfläche, die kälteste Region auf der Erde. Außerdem ist sie für TRIPLE besonders interessant, weil sich dort unter dem 4 km dicken Eisschild ein subglazialer See befindet [9]. Als Demonstrationsort mit Umgebungsparametern, die den Verhältnissen auf dem Mond Europa besonders nahe kommen, ist Dome-C aus diesem Grund besonders geeignet. Zusätzlich kann der Feldtest auch unmittelbar für eine wissenschaftliche Exploration der Region Dome-C genutzt werden.

### Vorfelderkundungssystem für Schmelzsonden

Ein Vorfelderkundungssystem – FRS (engl. Abkürzung für Forefield Reconnaissance System) wird benötigt, um mögliche Hindernisse vor der Schmelzsonde und den Eis-Wasser-Übergang zum subglazialen See zu detektieren [7]. Hindernisse könnten dazu führen, dass die Schmelzsonde stecken bleibt und sich dadurch die Expeditionsdauer verzögert. Der geplante Feldtest in der Dome-C-Region soll innerhalb einer Sommer-Saison durchgeführt werden, weil die Arbeit an diesem Ort mit einer Durchschnittstemperatur von  $-65^{\circ}\text{C}$  im Winter [10] nicht möglich ist. Darüber hinaus ist es für die Freisetzung und das Einfangen des Unterwasserfahrzeugs entscheidend, dass die Sonde sich an der Eis-Wasser-Grenzschicht sicher verankern kann. Die Detektion des Phasenübergangs zwischen den Medien gehört daher auch zur Aufgabe von FRS.

Im Rahmen des TRIPLE-FRS-Projekts wird ein hybrides Vorfelderkundungssystem aus Sonar und Radar entwickelt, um die komplementären Vorteile beider Technologien ausnutzen zu können. Beide Verfahren werden in der Glaziologie, z. B. zur Abbildung von Strukturen in Eis oder zur Messung der Eisdicke [11, 12] eingesetzt. Sie basieren beide auf der Messung von Reflexionen an Grenzflächen zwischen zwei unterschiedlichen Medien, beispielsweise Luft-Eis, Eis-Gletscherboden oder inneren Schichten im Eis. Radar verwendet elektromagnetische Wellen im GHz-Frequenzbereich, während Sonar mit Schalldruckwellen im kHz-Bereich arbeitet. Radar eignet sich gut für Messungen im trockenen Eis, hat allerdings eine hohe Dämpfung in nassen Umgebungen [13], wie an einer Grenzschicht zu Wasser oder an den mit Wasser gefüllten Spalten. Sonar kann dagegen auch in feuchten Umgebungen eingesetzt werden. Allerdings erfordert dies eine gute Impedanzanpassung zwischen dem

Schallwandler und dem Medium, um eine maximale Schalleinkopplung ins Eis zu gewährleisten.

Im Weiteren wird unter FRS das Gesamtsystem TRIPLE-FRS verstanden, das aus der Kombination beider Technologien besteht. Insbesondere wird der Begriff Sonar oder auch FRS-Sonar als Synonym für das TRIPLE-FRS-Sonar verwendet.

Um die Möglichkeit zu haben, das FRS in einem ausgedehnten Eisvolumen zu testen, werden regelmäßig Tests auf Alpengletschern durchgeführt. Zu diesem Zweck wird eine Schmelzsonde als Trägersystem für das FRS verwendet, die einen vergleichbaren Bauraum hat wie die TRIPLE-IceCraft-Schmelzsonde. Damit wird sichergestellt, dass der Transfer des Systems auf die TRIPLE-IceCraft-Sonde möglich ist.

### Anforderungen und Design des Sonars

#### Schallwandler und Sensoren

Für die Funktion eines aktiven Sonars wird der Schallwandler sowohl als Sender als auch als Empfänger verwendet. Eine der größten Herausforderungen ist die Integration des Schallwandlers in den Schmelzkopf der Sonde, so dass eine möglichst gute Schallübertragung in das Medium erreicht wird. Der Schmelzkopf der TRIPLE-IceCraft-Sonde ist mit mehreren Heizelementen ausgestattet und bietet dadurch nur ein begrenztes freies Volumen für die Antennen des Radars und den Schallwandler des Sonars von FRS. Zudem muss die hohe Schmelzgeschwindigkeit auch mit integriertem FRS weiterhin garantiert werden. Unter Verwendung eines Tonpilzschallwandlers [14] lässt sich der Heizkopf der Schmelzsonde selbst als schwingende Frontmasse des Sonar-Schallwandlers nutzen.

Ein Querschnitt des Schallwandlers ist in Abbildung 3 zu finden. Zu den Hauptkomponenten gehören die Heckmasse, der Antriebsstapel und die Kopfmasse. Der Antriebsstapel besteht aus 16 piezokeramischen Scheiben des Materials Sonox P4 (Hersteller CeramTec), welcher mithilfe eines Gewindebolzens zwischen der Heckmasse (Material Edelstahl) und der Kopfmasse der Sonde (Material Hovadur CNCS) eingespannt wird. Die Richtung der Schallausbreitung wird über das Verhältnis von Kopf- zur Heckmasse festgelegt. Damit der Kopf die Schwingungen, welche durch den Antriebsstapel erzeugt werden, in Vorwärtsrichtung überträgt, muss die Kopfmasse kleiner sein als die Heckmasse.

Als zusätzliche Akustiksensoren werden drei weitere Piezoscheiben, nachfolgend auch als Seitensensoren bezeichnet, an die innere Seite des Schmelzkopfs geklebt. Dabei beträgt der Winkelabstand zwischen ihnen  $120^{\circ}$ . Über Laufzeitunterschiede kann so eine Richtungsauflösung für reflektierte Signale erhalten werden.

### Signalgenerierung und -empfang

Um das Sonar in Eis verwenden zu können, müssen geeignete Sendesignale erzeugt werden. Eis als Festkörper ermöglicht sowohl die Ausbreitung von Longitudinal- als auch Transversalwellen, wobei die Geschwindigkeit der Longitudinalwellen etwa doppelt so hoch ist wie die der Transversalwellen [15]. Im Folgenden werden immer nur Longitudinalwellen betrachtet. Darüber hinaus ist die Schallgeschwindigkeit stark von den Eigenschaften des Eises abhängig und kann von Gletscher zu Gletscher variieren. Für Alpengletscher liegt sie typischerweise bei 3 447 m/s [16] und führt bei einer großen Signallänge zu einer langen Totzeit. Bei nahen Zielen ist eine Überlagerung zwischen dem emittierten und reflektierten Signal in dem Aufnahme Fenster möglich. Für die Detektion von Reflexionen sind aus diesem Grund möglichst kurze und komprimierte Signale mit einer Dauer von wenigen ms erforderlich.

Zudem muss die Dämpfung des Signals berücksichtigt werden. Der entscheidende Parameter hierbei ist die Eindringtiefe bzw. die Abschwächlänge, die die Distanz angibt, nach welcher die ursprüngliche Amplitude des Signals auf  $1/e$  gesunken ist. In einem Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 35 kHz fällt sie im Gletschereis mit zunehmenden Frequenzen typischerweise von 15 m auf 5 m [16]. Aus diesem Grund sind Signale mit hoher Amplitude und niedriger Frequenz für eine große Reichweite erforderlich. Die zugehörige Elektronik umfasst dedizierte Elektronik für den Schallwandler als Sender und Frontempfänger sowie für die Seitenempfänger. Das Blockdiagramm in Abbildung 4 illustriert den Signalweg über den Schallwandler bis zur angeschlossenen Sensorik. Das Pinger-Front-End hat die Aufgabe, die Treibersignale für den Schallwandler zu erzeugen und zu verstärken. Durch eine Schaltung

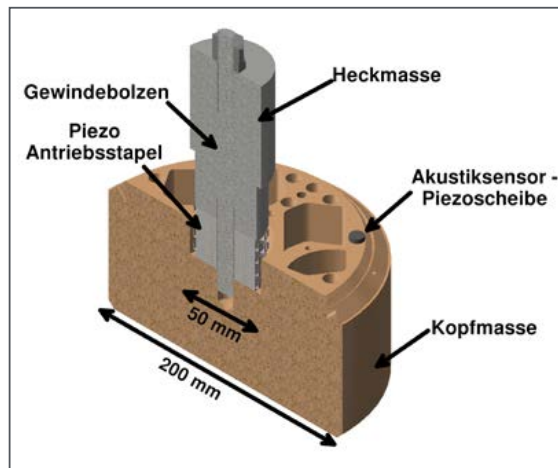
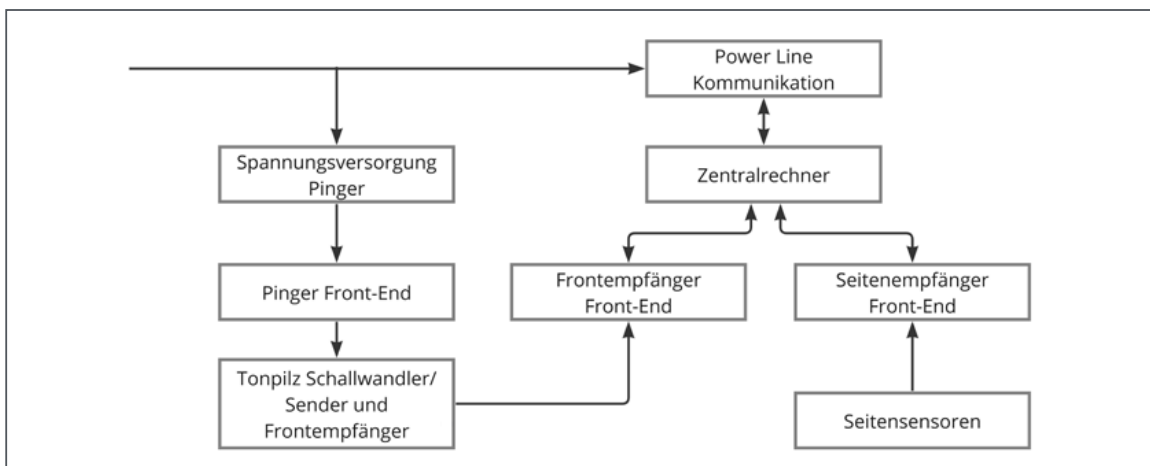


Abb. 3: Mechanischer Aufbau des Schallwandlers mit Tonpiliz-Design, wie er in dem Demonstrationssystem integriert ist. Der Schmelzkopf dient sowohl als Schallgeber als auch als Vorderschallempfänger. Die großen Aussparungen sind für die Radarantennen vorgesehen, während die kleinen für die Heizelemente und Temperatursensoren bestimmt sind.

in der Pinger-Front-End-Elektronik kann die Sendelektronik von der Empfangselektronik entkoppelt werden, um schwache Signale besser zu empfangen. Die Empfangselektronik ermöglicht die Verstärkung, Filterung und Digitalisierung der Signale mit einer einstellbaren Abtastrate. Die Überwachung, Steuerung und Synchronisation aller Subsysteme wird von einem lokal eingebauten Zentralrechner übernommen. Dort werden auch die akustischen Daten ausgelesen, gespeichert und gegebenenfalls weitergeleitet. Die globale Spannungsversorgung und externe Kommunikation erfolgen über ein einziges Kabel. Dabei wird mithilfe der Powerline Communication (PLC) das Datensignal auf die Spannungsversorgungsleitung moduliert.

Abb. 4: Diagramm der Signalgenerierung und Sensorik im FRS-Sonar. Die globale Spannungsversorgung und die Kommunikation erfolgen über ein einziges Kabel. Die Steuerung und das Auslesen der Daten werden von einem lokal eingebauten Zentralrechner übernommen.



Tab. 1: Spezifikation der Signalgenerierung-Elektronik; Parameter (links) und mögliche Einstellungen (rechts)

Signalform	Variabel, z. B. Chirp, Barker-Code, Sinus Burst
Frequenzbereich	bis zu 1 000 kHz
Samplingrate	max. 2 MSamples/s
Anzahl Samples	max. 1 500
Emitter Spannung am Wandler	max. 600 V (Peak-to-Peak)

Tab. 2: Spezifikation der Sensorelektronik; Parameter (links) und Wertebereich (rechts)

Samplingrate	max. 2 MSamples/s
ADC-Auflösung	12 bit
ADC-Referenzspannung	3,3 V
Verstärkung	64–92 dB

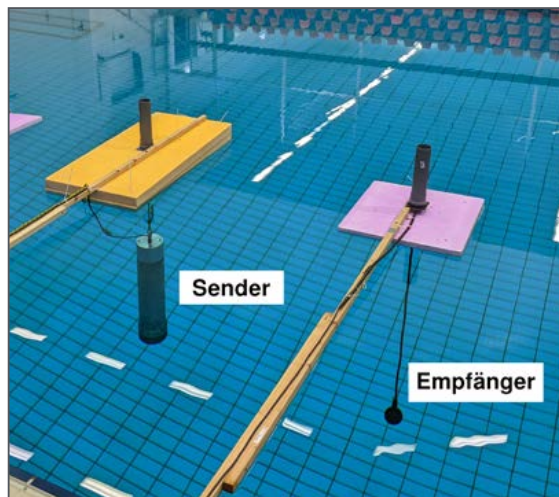
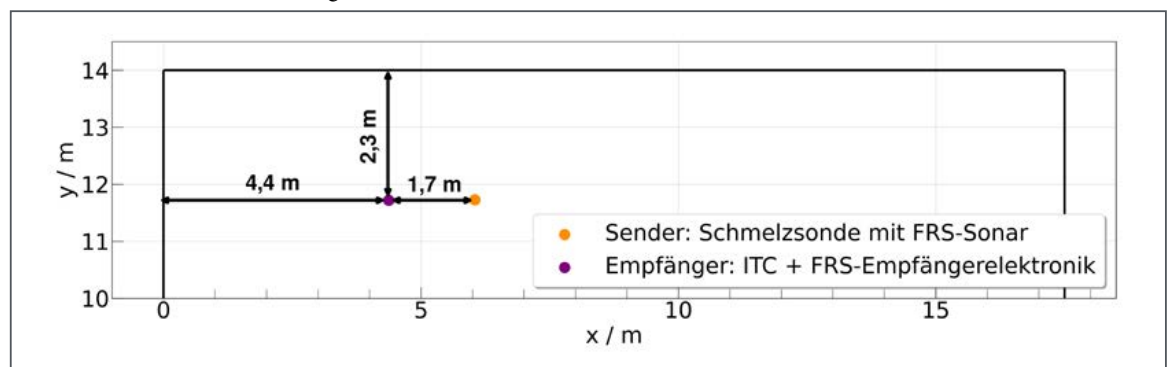


Abb. 5: Testaufbau: Sender-Schmelzsonde mit integriertem FRS-Sonar (links) und Empfänger-Hydrophon ITC1001 verbunden mit FRS-Sonar-Empfängerelektronik (rechts)

Abb. 6: Draufsicht auf den Testaufbau. Die Ränder des Wasserbeckens (Breite x Höhe x Tiefe: 17,5 x 14 x 4,55 m) sind durch schwarze Linien dargestellt.



Die Spannungsversorgung-Pinger ist ein Regler, der die 230 VAC-Eingangsspannung in eine geregelte Ausgangsspannung von 10 VDC bis 300 VDC umwandelt. Das Pinger-Front-End nutzt diese Spannung, um bipolare Rechteckpulse zu erzeugen, und um den Schallwandler anzutreiben. Durch Variation der Dauer der Schaltzustände können auf diese Weise komplexe Signale, wie Chirps oder Barker-Codes, angenähert werden.

Die Elektronik ermöglicht das Generieren von Signalen mit einer Abtastrate von bis zu 2 MSamples/s. Ein Überblick über die Spezifikation der Signalgenerierung ist in Tabelle 1 zu finden.

Die Front-End-Elektronik für die Front- und Seitensensoren besitzt jeweils zwei Filterkanäle. Einer davon ist ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 60 kHz und der andere ist ein Bandpassfilter mit einer Mittenfrequenz von 10 kHz und einer Bandbreite von 6 kHz. Über eine verstellbare Verstärkerschaltung können die Empfangssignale mit einer Verstärkung zwischen 64 dB und 92 dB verstärkt werden, bevor sie von einem Analog-Digital-Wandler (ADC) digitalisiert werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Spezifikation der Sensorelektronik.

### Systemtest im Wasser

Zur Vorbereitung auf den Testeinsatz auf Alpengletschern und zur Validierung der Funktionsfähigkeit des Sonars, wurde das vorgestellte Sonarsystem in einem städtischen Schwimmbad getestet. Als Sender wurde das FRS-Sonar verwendet, welches in der Schmelzsonde eingebaut wurde. Darin sind sowohl der Schallwandler als auch die vollständige Sender- und Empfängerelektronik integriert. Als Empfänger wurde ein sphärisches omnidirektionales Hydrophon ITC-1001 [17] benutzt, das an eine zur FRS-Sonar-Empfängerelektronik baugleichen Elektronik angeschlossen ist. Abbildung 5 zeigt den Testaufbau vor Ort und Abbildung 6 gibt eine Übersicht über die Koordinaten der einzelnen Instrumente. Beide

haben den gleichen Abstand zum nächsten Beckenrand und eine Entfernung von 2,25 m zum Boden des Beckens.

Im Rahmen des Tests wurden mit der FRS-Sonde verschiedene Signale mit unterschiedlichen Sendespannungen gesendet. Sender und Empfänger sind zeitlich synchronisiert, so dass das Aufnahmezeitfenster vom Empfänger zeitgleich mit dem Sendetrigger startet. Aus der Analyse der Daten kann die Ankunftszeit des direkten Signals sowie von Reflexionen aus dem Becken an der Position des Empfängers bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Beckengeometrie und Schallgeschwindigkeit im Wasser ist ein Vergleich mit der theoretischen Erwartung möglich. Um den Dynamikbereich des ADC-Wandlers in der Empfängerelektronik nicht zu überschreiten, wurde stets mit der kleinstmöglichen Sendespannung ( $\sim 5\text{ V}$ ) und der niedrigsten Verstärkungsstufe gemessen.

Zum Vergleich werden im Folgenden zwei verschiedene Signalformen betrachtet, die am Tiefpassfilterkanal vom Empfänger aufgenommen wurden.

Abbildung 7 zeigt einen 4 ms-langen logarithmischen Chirp zwischen 5 und 15 kHz. Das direkte Signal ist nach der zu erwartenden Laufzeit von etwa 1,2 ms, unter der Annahme einer Schallgeschwindigkeit von  $1\,500\text{ ms}^{-1}$ , sichtbar. Gut zu erkennen ist die typische zeitliche Frequenzänderung eines Chirps in dem zugehörigen Spektrogramm in Abbildung 8. In der logarithmischen Darstellung folgt der Verlauf der Frequenz einer Geraden. Nach dem direkten Signal können mehrere Reflexionen beobachtet werden, die von der Wasseroberfläche, dem Boden sowie den Rändern des Beckens stammen.

Abbildung 9 zeigt ein monofrequentes Barker-Signal mit einer Länge von 11-Werten und einer Frequenz von 10 kHz. Betrachtet man das zugehörige Spektrogramm in Abbildung 10, ist, wie erwartet, nur die Sendefrequenz deutlich erkennbar. Auch hier sind nach der Ankunft des direkten Signals weitere Reflexionen sichtbar.

Der Wassertest demonstriert, dass der FRS-Schallwandler in der Lage ist, verschiedene Signalformen zu senden. Gleichzeitig ist es möglich, mit der Empfängerelektronik, nicht nur das ausgesendete Signal, sondern auch zusätzliche Reflexionen aufzunehmen.

## Fazit und Ausblick

In TRIPLE-FRS wird ein hybrides Vorfelderkundungssystem für den Einsatz in einer Schmelzsonde entwickelt, das Sonar- und Radar-Technologien kombiniert. Für das akustische System wurde ein Schallwandler im Tonpils-Design gewählt, der den Schmelzkopf der Sonde sowohl für die Schallauskopplung als auch für den Schallempfang nutzt. Dedizierte Elektro-

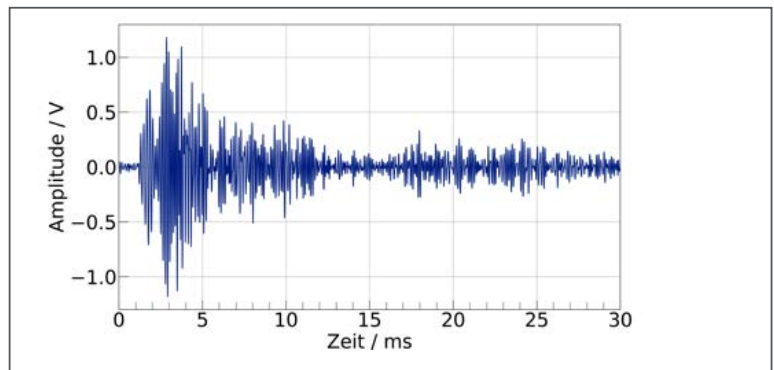


Abb. 7: Aufgenommenes Signal am Empfänger. Sendesignal: 4 ms logarithmischer Chirp zwischen 5 kHz und 15 kHz

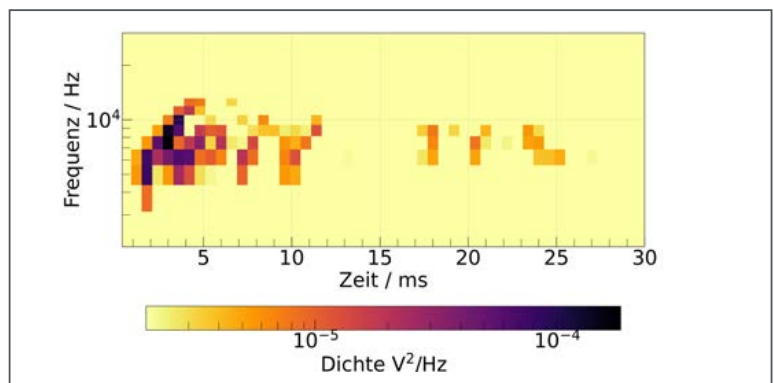


Abb. 8: Spektrogramm des aufgenommenen Signals am Empfänger: 4 ms logarithmisches Chirpsignal zwischen 5 kHz und 15 kHz

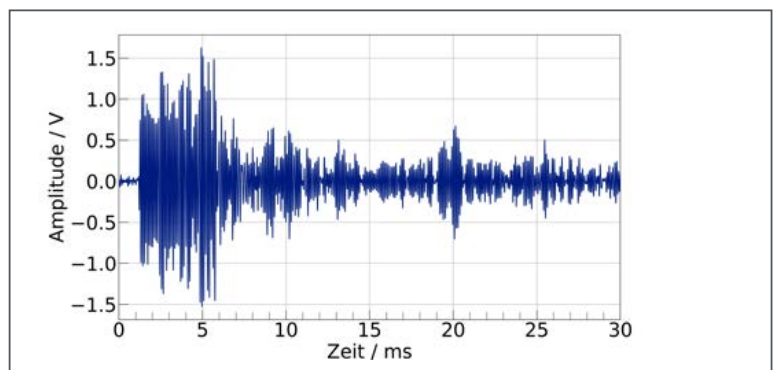


Abb. 9: Aufgenommenes Signal am Empfänger. Sendesignal: Barker-Code mit Länge 11-Werten und 10 kHz

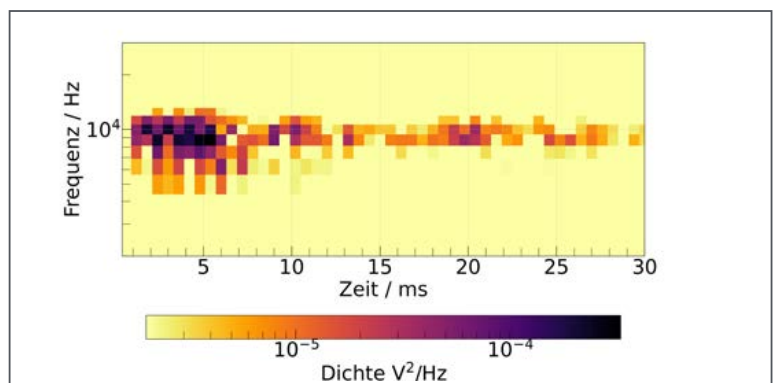


Abb. 10: Spektrogramm des aufgenommenen Signals am Empfänger: Barkercode mit Länge 11-Werten und 10 kHz

niksysteme für die Signalgenerierung im Sendemodus und für die Verstärkung, Filterung und Digitalisierung im Empfangsmodus wurden entwickelt.

Um das Gesamtsystem unter realen Bedingungen im Wasser und auf Gletschern testen zu können, wurde eine Schmelzsonde als Trägersystem für das FRS eingesetzt. Die Funktionalität des FRS-Sonars in Bezug auf Senden und Empfangen konnte erfolgreich in einem Wassertest demonstriert werden.

Zusätzlich fand im März 2023 eine Demonstration des gesamten FRS-Systems auf dem Aletschgletscher in der Schweiz statt. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse aus dieser Demonstration ist derzeit in Bearbeitung.

Um die optimale Leistungsfähigkeit des FRS-Sonars für den anstehenden antarktischen Testeinsatz der TRIPLE-Schmelzsonde zu gewährleisten, liegt der Fokus der nächsten Projektphase auf der Systemoptimierung für den Einsatz in Eis sowie auf der Anpassung für eine größere Schmelzsonde. Dies umfasst sowohl die allgemeine Untersuchung des Systemverhaltens als auch die Analyse der Auswirkungen verschiedener Sendesignale auf die Leistung.

Weitere Information zu TRIPLE und TRIPLE-FRS finden Sie hier:

- III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen: <http://www.rwth-aachen.de/EnEx>
- TRIPLE Homepage: <https://triple-project.net>

### Danksagung

Die Projektklinie TRIPLE, sowie die Verbundvorhaben TRIPLE-FRS, TRIPLE-FRS-2 und TRIPLE-IceCraft sind Teil der Explorer-Initiativen der Deutschen Raumfahrtagentur im DLR. Das Teilvorhaben TRIPLE-FRS/FRS-2 und TRIPLE-IceCraft der RWTH Aachen werden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, unter dem Förderkennzeichen 50RK2053, 50RK2352C und 50RK1956 gefördert.

### Literatur

- [1] Ashkenazy Y.: The surface temperature of Europa. In: *Heliyon* 5.6, e01908, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01908>
- [2] Howell S. M.: The Likely Thickness of Europa's Icy Shell. In: *The Planetary Science Journal* 2.4, S. 129, 2021. <https://doi.org/10.3847/PSJ/abfe10>
- [3] Grasset, O.; Dougherty, M.K.; Coustenis, A.; Bunce, E.J.; Erd, C.; Titov, D.; Blanc, M.; Coates, A.; Drossart, P.; Fletcher, L.N.; Hussmann, H.; Jaumann, R.; Krupp, N.; Lebreton, J.-P.; Prieto-Ballesteros, O.; Tortora, P.; Tosi, F.; van Hoolst, T.: JUPITER ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system. In: *Planetary and Space Science* 78, S. 1–21, 2013. issn: 0032-0633. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002>
- [4] Howell S. M.; Pappalardo R. T.: NASA's Europa Clipper – a mission to a potentially habitable ocean world. In: *Nature*

*Communications* 11, S. 2 041–1 723, 2020. issn: 0032-0633. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15160-9>

- [5] Talalay, P. G.: Hot-Point Drills. In: *Thermal Ice Drilling Technology*. Singapore: Springer Singapore, 2020, S. 1–80. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8848-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8848-4_1)
- [6] Waldmann, C.; de Vera, J.; Dachwald, B.; Strasdeit, H.; Sohl, F.; Hanff, H., et al.: Search for life in ice-covered oceans and lakes beyond Earth. In: 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), S. 1–7, 2018.
- [7] Heinen, D.; Audehm, J.; Becker, F.; Boeck, G.; Espe, C.; Feldmann, M.; Francke, G.; Friend, P.; Haberberger, N.; Helbing, K.; Nghe, C. T.; Stelzig, M.; Vossiek, M.; Wiebusch, C.; Zierke, S.: The TRIPLE Melting Probe – an Electro-Thermal Drill with a Forefield Reconnaissance System to Access Subglacial Lakes and Oceans. In: *OCEANS 2021*. San Diego – Porto, 2021.
- [8] Heinen, D.: TRIPLE-IceCraft Expedition in die Antarktis – DLR Blog. <https://www.dlr.de/blogs/desktopdefault.aspx/tabid-5893/searchtagid-62751/> (abgerufen am 26.07.2023).
- [9] Siegert, M.J.; Carter, S.; Tabacco, I.; Popov, S.; Blankenship, D.D.: A revised inventory of Antarctic subglacial lakes. In: *Antarctic Science* 17.3, S. 453–460, 2005. <https://doi.org/10.1017/S0954102005002889>
- [10] Genthon, C.; Veron, D.; Vignon, E.; Six, D.; Dufresne, J.-L.; Madeleine, J.-B.; Sultan, E.; Forget, F.: 10 years of temperature and wind observation on a 45 m tower at Dome C, East Antarctic plateau. In: *Earth System Science Data* 13.12, S. 5 731–5 746, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5731-2021> <https://essd.copernicus.org/articles/13/5731/2021/>
- [11] Ackley, S.F.; Perovich, D.K.; Maksym, T.; Weissling, B.; Xie, H.: Surface flooding of Antarctic summer sea ice. In: *Annals of Glaciology* 61.82, S. 117–126, 2020. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.22>
- [12] Schroeder, D.M.; Bingham, R. G.; Blankenship, D.D.; Christianson, K.; Eisen, O.; Flowers, G.E.; Karlsson, N.B.; Koutnik, M.R.; Paden, J.D.; Siegert, M.J.: Five decades of radioglaciology. In: *Annals of Glaciology* 61.81, S. 1–13, 2020. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.11>
- [13] Cafarella, L.; Zirizzotti, A.; Urbini, S.; Baskaradas, J. A. Radar Systems for Glaciology. In: *Radar Technology*. Rijeka: IntechOpen, 2010. Kap. 9. <https://doi.org/10.5772/7179>
- [14] Sherman, C. H.; Butler, J. L.: *Transducers and Array for Underwater Sound*. Springer, 2007.
- [15] Vogt, C.; Laihem, K.; Wiebusch, C.: Speed of sound in bubble-free ice. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 124.6, S. 3 613–3 618, 2008. issn: 0001-4966. <https://doi.org/10.1121/1.2996304>
- [16] Meyer, A.; Eliseev, D.; Heinen, D.; Linder, P.; Scholz, F.; Weinstock, L.S.; Wiebusch, C.; Zierke, S.: Attenuation of sound in glacier ice from 2 to 35 kHz. In: *The Cryosphere*, S. 1 381–1 394, 2019. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1381-2019>
- [17] Model ITC-1001 Spherical Omnidirectional Transducer <https://www.gavial.com/itc-products> (zuletzt aufgerufen am 26.07.2023). ■

**M. Sc. Mia Giang Do**  
RWTH Aachen University, III. Physikalisches Institut B

**M. Sc. Jan Audehm**  
RWTH Aachen University, III. Physikalisches Institut B

**Dr. Dirk Heinen**  
RWTH Aachen University, III. Physikalisches Institut B

**Prof. Dr. Christopher Wiebusch**  
RWTH Aachen University, III. Physikalisches Institut B

**Dr. Simon Zierke**  
RWTH Aachen University, III. Physikalisches Institut B