Akustische Navigation - Ortung und Vorfelderkundung - von Einschmelzsonden in Gletschereis

Dirk Heinen, Dmitry Eliseev, Peter Linder, Franziska Scholz, Lars Steffen Weinstock, Christopher Wiebusch, Marvin Willam und Simon Zierke

RWTH Aachen University, III. Physikalisches Institut, 52074 Aachen, Deutschland,

Email: heinen@physik.rwth-aachen.de

Enceladus-Explorer-Initiative

Im Rahmen der Enceladus-Explorer-Initiative des DLR Raumfahrtmanagements werden Navigationstechnologien für zukünftige Raumfahrtmissionen erforscht. Diese Technologien sollen die Suche nach außerirdischem Leben auf dem Saturnmond Enceladus ermöglichen. Eine autonome Sonde, die EnEx-Sonde, soll eine Flüssigkeitsprobe aus einem unter einem Eispanzer liegenden Ozean (Abb. 1) entnehmen.

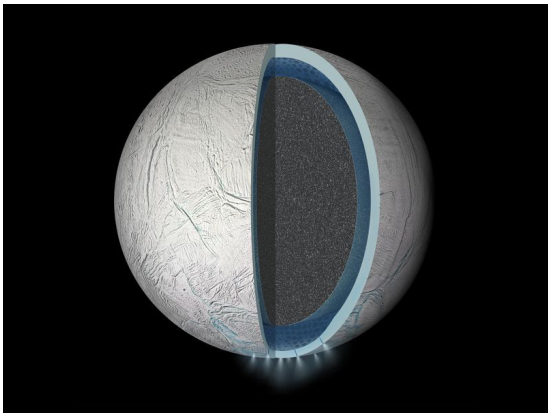

Abbildung 1: Unter dem Eispanzer des Enceladus befindet sich ein globaler Ozean. Im Bereich der Kyrovulkane im Süden kann eine flüssige Probe auch Oberflächennah genommen werden. (NASA/JPL-Caltech)

Akustische In-Eis-Navigation

Eine erste EnEx-Sonde wurde im EnEx-Verbundprojekt entwickelt und hat erfolgreich in einem terrestrischen Testszenario im November 2014 in der Antarktis eine subglaziale Flüssigkeitsprobe entnommen [1]. Diese EnEx-Sonde basiert auf dem Prinzip des IceMoles [2]. Dieser ist eine kombinierte Bohr- und Einschmelzsonde, mit der Möglichkeit durch partielle Ansteuerung von Heizelementen Kurven zu fahren. Um die EnEx-Sonde durch das Eis zur Flüssigkeit navigieren zu können, wurden geeignete Navigationsverfahren evaluiert und in die Sonde integriert. Zusätzlich zu herkömmlichen Navigationslösungen werden in der EnEx-Sonde zwei akustische Systeme verwendet. Das erste akustische System untersucht das Vorfeld der Sonde und das Zweite dient der Lokalisierung der Sonde.
Nach dem erfolgreichen Abschluss des EnEx-Verbundprojekts werden nun beide Systeme im Rahmen des EnEx-RANGE-Projekts weiterentwickelt. Dies geschieht in Zusammenarbeit zwischen dem III. Physikalischen Instituts und dem Institutscluster IMA/ZLW & IfU der RWTH Aachen.

Akustische Vorfelderkundung

Dieses Navigationssystem untersucht das Vorfeld der Sonde und basiert auf dem Prinzip der Sonographie. Mit Hilfe von vier linearen Piezoarrays können Informationen über Hindernisse im Vorfeld der Sonde oder auch die gesuchte Flüssigkeitsspalte gewonnen werden. Die Piezoarrays sind kreuzweise um die zentrierte Eisschraube in den Schmelzkopf der Sonde integriert. Jedes Array besteht aus 16 aktiven Elementen mit einer Resonanzfrequenz von 780 kHz. Über phasenverschobene Ansteuerung kann der Winkel der ausgesendeten Schallkeule verändert und so das Vorfeld der Sonde abgescannt werden. Die ausgesendeten Pulse werden von strukturellen Anomalien im Eis zurückgeworfen und die Echos von den Piezoarrays empfangen.
Bei Laborversuchen an kleinen Klareisvolumen (bis zu $3\,m^3$) wurden anhand von Mehrfachreflektionen „Sichtweiten“ von mehreren Metern erreicht, wobei große Verluste an Phasenübergängen und Reflektionsschichten unberücksichtigt blieben. Vollsystemtests des in die Sonde integrierten Systems wurden in einem Schwimmbad in Wasser durchgeführt (Abb. 2). Hierbei konnten sowohl luft- als auch betongefüllte Phantome mit 20 cm Durchmesser lokalisiert werden. Der maximale Abstand betrug hierbei 6 m, begrenzt durch das Sampling-Fenster und die

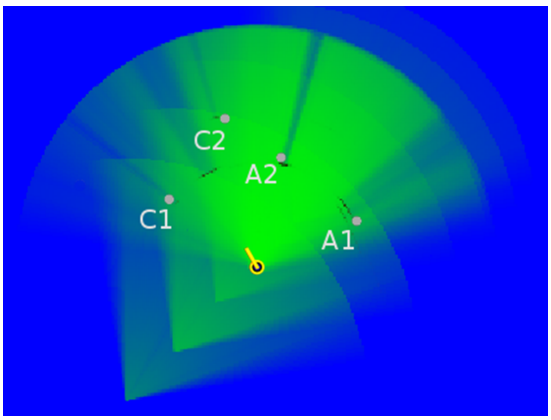

Abbildung 2: Der Graph zeigt überlagerte B-Scans von einem Test in Wasser. C1 und C2 sind Phantome aus Beton und A1 und A2 luftgefüllte Phantome.

niedrigere Schallgeschwindigkeit in Wasser im Vergleich zu Eis.
Das System zur akustischen Umfelderkundung ist im Manuskript Linder et al., Sonographische Visualisierung struktureller Anomalien in Gletschereis, auch DAGA 2016, detailliert beschrieben.

Akustische Lokalisierung

Dieses Navigationssystem wurde im Rahmen des EnEx-Verbundprojekts zur Lokalisierung der Sonde im Eis entwickelt [3]. Das System besteht aus mehreren akustischen Signalgebern an Referenzpositionen an der Gletscheroberfläche und auf akustischen Empfängern in der Sonde (Abb. 3). Die Positionen der Signalgeber werden mithilfe eines GPS-Empfängers eingemessen.
Die Signalgeber senden akustische Signale mit einer Frequenz von 18 kHz, synchron wird in der Sonde die Datennahme gestartet und die Signale werden registriert. Die Signallaufzeiten werden bestimmt und in Entfernungen umgerechnet. Aus den ermittelten Distanzen zu sechs Signalgebern wird durch Trilateration die absolute Position der Sonde bestimmt. Die Signalgeber wurden im

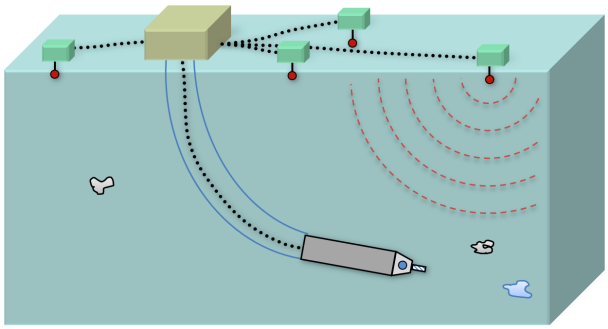

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Funktionsprinzip der akustischen Lokalisierung der EnEx-Sonde im Eis.

EnEx-Verbundprojekt manuell in den Gletscher eingebracht und eingemessen. Die Güte der Lokalisierung war durch die Einbringung aller Signalgeber auf einer Ebene begrenzt. Um die Autonomie des System und die Lokalisierungsgüte zu erhöhen wird in EnEx-RANGE das System der Signalgeber zu einem akustisches Netzwerk weiterentwickelt.

Akustisches Netzwerk

Das akustische Netzwerk (Abb. 4) besteht aus einzelnen autonomen Pingereinheiten (engl. Autonomous Pinger Unit, kurz APU). Diese sind mit aufeinander abgestimmten akustischen Sendern und rauscharmen akustischen Empfängern ausgestattet. Das APU-Trägersystem besitzt die Fähigkeit sich selbst in einen Gletscher einzuschmelzen. Zusätzlich kann durch einen MARG-Sensor die Lage der APU abgeschätzt werden. Ein leistungsstarkes Datensystem verarbeitet die Sensordaten und steuert die Aktorik. Es wird eine lokale Entscheidungslogik implementiert, die auf Basis der Bewertung der Messdaten agiert. Diese lokale Entscheidungslogik realisiert die verteilte Optimierung des Netzwerks. Neben der

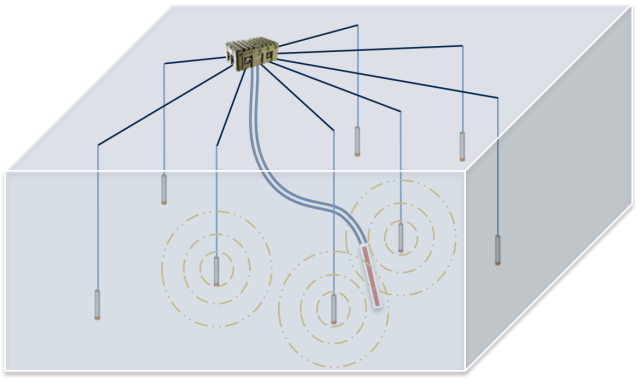

Abbildung 4: Das Netzwerk aus APUs dient als Referenzsystem für die Lokalisierung der EnEx-Sonde.

automatisierten Positionsbestimmung über den wechselseitigen Austausch akustischer Signale erfolgt auch die selbständige Bewertung der Qualität dieser Signale. Diese Informationen werden zur Optimierung der Genauigkeit der Ortsbestimmung und der gleichförmigen Abdeckung des Testfeldes genutzt. Nach Aufbau des akustischen Netzwerkes dient dieses als Referenzsystem für die Lokalisierung der EnEx-Sonde. Eine erste APU-Schmelzsonde (Abb. 5) ohne akustische Instrumentierung wurde im Sommer 2015 erfolgreich auf einem Alpengletscher getestet.

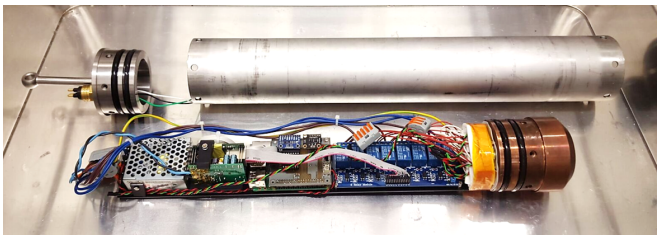

Abbildung 5: Die erste APU-Schmelzsonde, noch ohne akustische Instrumentierung, wurde im Sommer 2015 erfolgreich auf einem Alpengletscher getestet.

Akustische Instrumentierung

Zur Signalgenerierung können durch einen Arbiträr-Funktionsgenerator beliebige Wellenformen erzeugt und durch einen Leistungsverstärker verstärkt werden. Diese Signale werden auf einen PZT-Schallwandler, der voraussichtlich an den Schmelzkopf der APU gekoppelt ist, übertragen. Der Schallwandler soll eine möglichst sphärisch-homogene Abstrahlcharakteristik haben, eine ausreichende Schallleistung emittieren können und in die APU integrierbar sein. Momentan werden verschiedene Schallwandlerdesigns in Labormessungen evaluiert. Auf diese Tests aufbauend soll im Sommer 2016 ein akustischer Signalgeber in eine APU integriert und getestet werden.
Als akustische Empfänger werden in jede APU aus Gründen der Redundanz und der Möglichkeit eine Richtungsauflösung zu realisieren mindestens drei Sensoren integriert. Jeder Sensor besteht aus einem PZT-Schallwandler, einem Vorverstärker mit integriertem Fil-

ter und einem Analog-zu-Digital-Wandler. Die Datenspeicherung und Signalverarbeitung basiert auf einem System-on-Chip, um eine ausreichend schnelle und flexible Verarbeitung der Daten zu gewährleisten.
In der EnEx-Sonde sind vier akustische Sensoren in die Ecken des Schmelzkopf integriert. Analog zur APU besteht dieser Sensor ebenfalls aus einem PZT-Schallwandler, einem Vorverstärker mit Filter und einem Analog-zu-Digital-Wandler. Der Filter ist auf die Resonanzfrequenz der Signalgenerierung optimiert. Der Sensor sitzt in einer Metallhülse, um mechanisch geschützt und elektromagnetisch geschirmt zu sein. Die Datenerfassung basiert auf einem FPGA und einem Einplatinencomputer.

Signalverarbeitung und Trilateration

Die Messung pro Sender und pro Position wird mehrfach wiederholt um transiente Signale durch eine Medianbestimmung zu unterdrücken. Durch eine weitere - digitale - Bandpassfilterung wird das Rauschen weiter unterdrückt. Die Ankunftszeit des Signals wird über eine Schwellwertanalyse bestimmt. Nach der Bestimmung der Laufzeiten von allen Sendern wird eine Trilateration durchgeführt. Die rekonstruierten Positionen, basierend auf ausschließlich akustischen Daten, während einer Testfahrt auf einem Alpengletscher im Sommer 2014 sind in Abbildung 6 gezeigt.

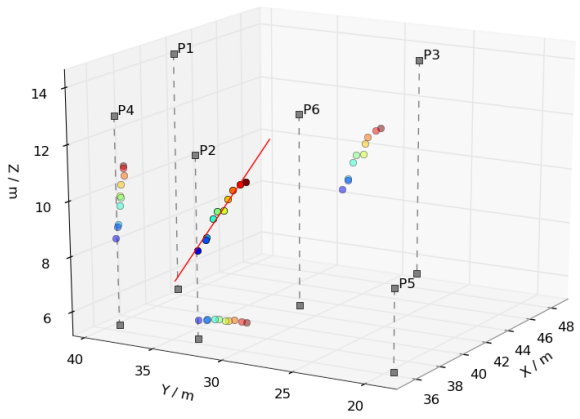

Abbildung 6: Der Graph zeigt die rekonstruierte Trajektorie im Feld der Sender während einer Testfahrt. Die akustischen Sender P1-P6 sind als graue Rechtecke dargestellt. Jede rekonstruierte Position ist als eingefärbter Kreis dargestellt. Die Zeit ist im Farbverlauf kodiert, Rot entspricht der ersten Position und Blau der letzten. Alle rekonstruierten Punkte sind für eine klarere Darstellung auch auf die Koordinatenebenen projiziert.

Terrestrische Szenarios

Die EnEx-Sonde inklusive beider akustischen Navigationssysteme wurde im November 2014 in der Antarktis erfolgreich demonstriert [1]. Die Entwicklungen und die Systemoptimierung in EnEx-RANGE werden durch Systemtests in Wasser und auf Alpengletschern validiert. Da der logistische Aufwand von Gletschermessungen sehr hoch ist werden Messungen wenn möglich in Wasser durchgeführt. Kleine Tests können im institutseigenen Labor, dem Aachener Akustik Labor, durchgeführt werden. Größere Tests werden in einem lokalen Schwimmbad oder im Freiwasser durchgeführt. Dies erlaubt weitläufige Anordnungen des APU-Netzwerkes und verschiedene Testszenarien.
Der erste Test des aus mehreren APUs bestehenden Netzwerks auf einem Alpengletscher ist für den Sommer 2017 geplant. Das vollständige Netzwerk, auch im Zusammenspiel mit der EnEx-Sonde, soll im Eis eines Alpengletschers im Sommer 2018 final demonstriert werden.

Acknowledgement

EnEx-RANGE ist Teil der Enceladus-Explorer-Initiative des DLR Raumfahrtmanagements. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50NA1501 gefördert.

Literatur

[1] Kowalski et al.: Navigation technology for exploration of glacier ice with maneuverable melting probes. Cold Regions Science and Technology 123, S 53-70, 2016

[2] Dachwald, B. et al.: IceMole: A maneuverable probe for clean in situ analysis and sampling of subsurface ice and subglacial aquatic ecosystems. Annals of Glaciology 55(65), S. 14-22, 2014

[3] Eliseev, D. et al.: Acoustic in-ice positioning in the Enceladus Explorer project. Annals of Glaciology 55(68), S. 253-259, 2014