

Voruntersuchung zur Entwicklung und Anwendung eines geoelektrischen Bodenexperimentes zur Untersuchung von Körpern im Sonnensystem

Erik Pennewitz, Andreas Hördt, Uli Auster

Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, TU Braunschweig

Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit sind Voruntersuchungen zur Entwicklung eines elektrischen Bodenexperimentes, welches auf einem Körper des Sonnensystems den Untergrund erforschen kann.

Die Rahmenbedingungen der Untersuchungen orientieren sich an der russischen Phobos-Grunt-Mission. Bei diesem Unternehmen wird ein Lander-System auf dem Mars-Mond Phobos landen und dort vielfältige Untersuchungen, vor allem des Untergrundes, durchführen.

An die Füße dieses Landers wird vorgeschlagen, Elektroden anzubringen, welche kapazitiv einen Strom in den Phobos-Untergrund einspeisen können. In Abhängigkeit von der verwendeten Frequenz und dem Widerstand des Untergrundes kann so eine Bestimmung des Widerstandes und der dielektrischen Permittivität durchgeführt werden.

Im Rahmen dieser Weltraummission herrschen besondere technische Bedingungen, welche in dieser Arbeit untersucht wurden. So besitzt der Phobos-Grunt-Lander lediglich drei Beine. Um einen Strom in den hochohmigen Phobos-Untergrund einzuspeisen und stabile Ergebnisse zu erhalten, müssen die vier benötigten Elektroden jedoch möglichst nah und unter definierten Verhältnissen an den Boden gebracht werden. Hierfür wurden zwei als realistisch betrachtete technische Elektroden-Konstruktionen vorgeschlagen und untersucht.

Weitere Aspekte dieser Arbeit sind der Strom, der über die Elektroden in den Phobos-Boden eingespeist werden kann, und der zu minimierende Stromfluss im Lander selbst auf Grund kapazitiver Wechselwirkungen der Elektroden und der Kabel mit dem Spacecraft.

1 Einleitung

Geoelektrische Verfahren liefern seit einem Jahrhundert verlässliche und glaubwürdige Ergebnisse. Für diese geophysikalische Methode existieren eine Vielzahl an Auswerttechniken und Erfahrungen. Ziel aktueller Forschungen ist es nun, ein elektrisches Bodenexperiment nicht nur auf der Erde, sondern auch mit Hilfe eines Lander-Systems auf anderen Planeten, Asteroiden oder Monden einzusetzen.

Auf solchen Körpern werden jedoch Untergründe erwartet, welche einen hohen Widerstand besitzen und auf welchen es schwierig wird, galvanisch gekoppelte Elektroden einzubringen. Unter diesen Bedingungen ist es sinnvoll, die Stromeinkopplung und Spannungsmessung über kapazitive Elektroden zu realisieren.

Die Anwendung solcher kapazitiver Elektroden wurde erstmalig in den 60er-Jahren vorgeschlagen [Cook, 1956]. Anfang der neunziger Jahre wurde die Idee, Messungen mit Hilfe kapazitiv-gekoppelter Elektroden auf Körpern unseres Sonnensystems durchzuführen, durch Grard wieder aufgegriffen ([Grard, 1990a], [Grard, 1990b]). Diese beiden Arbeiten können durchaus als Geburtsstunde jüngerer Bemühungen angesehen werden, ein kapazitives Messsystem zur Erkundung von Untergründen im Verlauf einer Weltraummissionen zu verwenden.

In allen diesen Arbeiten wird lediglich eine Einführung in die Technik der kapazitiven Widerstandsbestimmung gegeben. Eine vollständigere und erweiterte Theorie wird hier jedoch nicht geschaffen. Dies geschieht in der Arbeit von Kuras [2002]. Hier wird ein Formalismus zur Interpretation kapazitiver Messungen entwickelt, welcher auch die Phasenmessung berücksich-

tigt. Des Weiteren wird eine Rückführung der Kapazitiven-Widerstands-Technik auf die Gleichstromgeoelektrik erreicht.

Mit der Permittivity Probe der Rosetta-Mission ist ein geoelektrisches Experiment zum Kometen Tschurjumow-Gerasimenko unterwegs [Seidensticker et al., 2007].

2 Grundlagen

Das Prinzip einer kapazitiven Elektrode ähnelt dem eines Kondensators. Die eine Platte des Kondensators ist die leitfähige Elektrode, die andere Platte des Kondensators wird durch den Untergrund gebildet. Die Luft oder bei einem Weltraumexperiment der freie Raum dazwischen stellt das Dielektrikum dar. Eine zeitlich veränderliche Ladung Q auf der Elektrode hat nun eine Ladungstrennung durch Influenz im Untergrund zur Folge. Über das elektrische Feld koppeln Elektrode und Boden und ein Wechselstrom wird im Untergrund generiert.

Bei dem hier geschilderten geoelektrischen Experiment werden vier solcher Elektroden benötigt. Zwei Elektroden (A und B) speisen einen Strom I in den Boden ein und erzeugen so an den zwei Potentialsensoren (M und N) eine Spannungsdifferenz ΔU . Dies ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

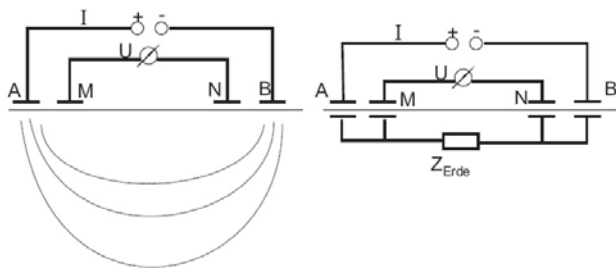


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messprinzips kapazitiver Elektroden.

Die Übergangswiderstände werden als Kapazitäten in Reihe mit der Impedanz des Bodens behandelt. Wegen ihres kapazitiven Blindwiderstandes gelangt mit zunehmender Frequenz mehr Strom in den Untergrund.

Das Signal des zu vermessenden Systems (hier Z_{Erde}) ergibt sich in Form einer komplexen Transfer-Impedanz, also einem Output-Signal $X_{out}(i\omega)$ des untersuchten Systems geteilt durch

eine Input-Anregung $X_{in}(i\omega)$. Im Fall des ERIC-Experimentes ist das Output-Signal eine Spannung und die Anregung ein Strom:

$$G(i\omega) = \frac{X_{out}(i\omega)}{X_{in}(i\omega)} = \frac{U(i\omega)}{I(i\omega)} = Z(i\omega). \quad (1)$$

Diese Transfer-Impedanz ist vom Strom unabhängig und ergibt sich für den Fall von vier kapazitiven Elektroden auf einem Untergrund zu:

$$Z = \frac{1}{i\omega C_0}(1 - K\alpha) = Z_0(1 - K\alpha). \quad (2)$$

Eine Herleitung dieser Beziehung ist in Kuras [2002] zu finden.

Die Größe $Z_0 = \frac{1}{i\omega C_0}$ ist die Vakuum-Impedanz, also die Impedanz eines Vierpols im freien Raum¹. In dieser Vakuum-Impedanz bezeichnet C_0 die Vakuumkapazität der Elektodenanordnung. Diese Kapazität einer Vierpunktanordnung ist geometrieabhängig:

$$C_0 = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{BN}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}}}. \quad (3)$$

Der Parameter K stellt den Geometriefaktor für eine spezielle Konfiguration der Elektroden dar:

$$K = \frac{\frac{1}{r'_{AM}} + \frac{1}{r'_{BN}} - \frac{1}{r'_{BM}} - \frac{1}{r'_{AN}}}{\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{BN}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}}}. \quad (4)$$

Er ist von der Geometrie abhängig, was bedeutet, dass auch die Höhe h der Elektroden über dem Untergrund in diesen Faktor eingeht. Jene Einbeziehung der Höhe macht einen ganz entscheidenden Unterschied zur Gleichstromgeoelektrik aus, bei welcher die (Spieß)Elektroden als auf dem Boden liegend bzw. in dem Boden steckend angenommen werden. Der Einfluss der Höhe der Elektroden macht sich besonders in der Phasenmessung bemerkbar. Befinden sich die kapazitiven Elektroden sehr nah am Boden, so ist $K \approx 1$. Bei großen Abständen der Elektroden über dem Untergrund gilt $K \rightarrow 0$.

¹Bei dem Phobos-Grunt-Lander wird zu dieser Vakuum-Impedanz noch der Einfluss des Landers selbst hinzu kommen.

α ist in Gleichung (2) der Faktor, welcher die elektrischen Eigenschaften des Untergrundes ² enthält. Für einen Wechselstrom ist diese Größe komplex:

$$\alpha = \frac{\rho \omega \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) - i}{\rho \omega \varepsilon_0 (\varepsilon_r + 1) - i} \quad (5)$$

ω stellt die Kreisfrequenz, ρ den spezifischen Widerstand, ε_0 die Permittivität des Vakuums und ε_r die relative Permittivität dar.

Bei einer bekannten Geometrie kann also auf Grund der gemessenen Transfer-Impedanz (Betrag und Phase) der spezifische Widerstand ρ und die relative Permittivität ε_r eines Untergrundes ermittelt werden.

3 Die Phobos-Grunt-Mission

Das russische Phobos-Grunt -Unternehmen ist eine sample-return-Mission, bei welcher ein Lander (Abbildung 2) auf dem Marsmond Phobos landen und mittels einer Rückkehrkapsel Bodenproben zur Erde zurückbringen soll.



Abbildung 2: Modell des Phobos-Grunt-Landers.

Im Verlauf dieser Mission ist nun geplant mit einem Boden-Experiment, basierend auf kapazitiver Stromeinkopplung den Untergrund des Marsmondes zu untersuchen. Dieses Experiment wird den Namen ERIC (**E**lectrical **R**esistivity **I**maging through **C**apacitive **E**lectrodes) tragen.

²und im Fall einer Messung im Weltraum auch die Eigenschaften des umgebenden Vakuums

4 Anbringung der vierten Elektrode

Wie in Abbildung 2 zu erkennen, besitzt der Phobos-Grunt-Lander lediglich drei Beine. Nach der Theorie werden für ein geoelektrisches Bodenexperiment jedoch vier Elektroden benötigt, zwei Stromelektroden und zwei Potentialsensoren. Diese müssen für die Stromeinspeisung bzw. Spannungsmessung, und für die Eindeutigkeit der Interpretation der Ergebnisse, so nah wie möglich an den Untergrund des Phobos-Mondes gebracht werden. Drei Elektroden können unter den Lander-Beinen befestigt werden, für die Anbringung der vierten Elektrode werden hier zwei Konstruktionsmöglichkeiten vorgestellt und diskutiert.

4.1 Anbringung der vierten Elektrode unter dem Lander-Körper

Bei dieser Lösung werden drei Elektroden unter den drei Lander-Füßen angebracht, eine vierte Elektrode wird mittels einer Konstruktion unter dem Lander-Körper befestigt. Dies ist in Abbildung 3 abgebildet.

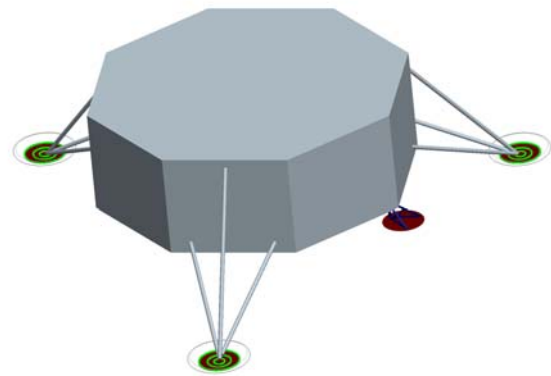


Abbildung 3: Die vier ERIC-Elektroden am Phobos-Lander. Die vierte Elektrode ist am Lander-Körper befestigt. Die Elektroden werden durch PEEK-Ringe (in grün eingezeichnet) von den Lander-Füßen fern gehalten (vergleiche Abschnitt 5).

Die vierte Elektrode befindet sich in einiger Erhöhung über dem Phobos-Untergrund, was sowohl eine Stromeinspeisung als auch eine Potentialmessung erschwert.

Die Fragestellung, welche sich für diese Elektrodenanbringung stellt ist: Wie wirkt sich die Höhe der vierten Elektrode auf die Stromeinspeisung/Spannungsmessung aus, und wo ist

ihre Position unter dem Lander-Körper am sinnvollsten?

Um diese beiden Aspekte zu beantworten, ist zunächst in Abbildung 4 die Elektrodengeometrie für eine vierte Elektrode unter dem Lander-Körper dargestellt. Die vierte Elektrode *B wandert* unter dem Lander, die eingezeichneten Hilfsgrößen variieren.

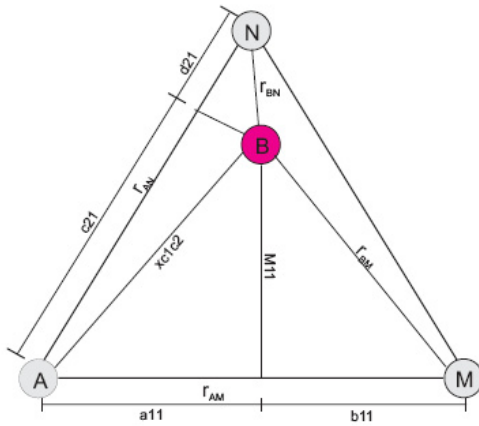


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Elektrodengeometrie. Die Position der vierten Elektrode (hier die Stromelektrode *B*, in violett eingezeichnet) variiert unter dem Lander-Körper. Eingezeichnet sind auch Hilfsgrößen.

In Abbildung 5 ist die Spannung an den Potentialsensoren *M* und *N* in Abhängigkeit von der Position der Stromelektrode *B* abgebildet. Die Elektroden *A*, *M* und *N* sind fest unter dem Lander angebracht, *B* kann variieren. Diese Elektrode befindet sich hier 30 cm über dem Boden. Wie der Strom bestimmt wurde, wird in Abschnitt 5 behandelt.

Der Farbwert gibt jeweils den Wert der Spannung an den Potentialsensoren an, wenn die vierte Elektrode an dieser Position unter dem Lander angebracht werden würde. Deutlich wird, dass lediglich in einem Bereich in der Mitte des Landers auf Grund einer Nullkonfiguration die Spannung sehr gering wird. Da die ERIC-Elektronik bis zu einer Grenze von $1 \mu V$ das Spannungssignal auflösen kann, ist nur hier eine Anbringung der Elektroden wegen der Spannung unmöglich.

Um heraus zu finden, welche Position der Elektrode unter dem Lander am sinnvollsten ist, wird die Transfer-Impedanz (Gleichung 2) in Abhängigkeit von der Frequenz und vom Geometriefaktor *K* (Gleichung 4) in Abbildung 6 dargestellt. Dieser *K*-Wert variiert hier lediglich von $K = 0,9 - 1$.

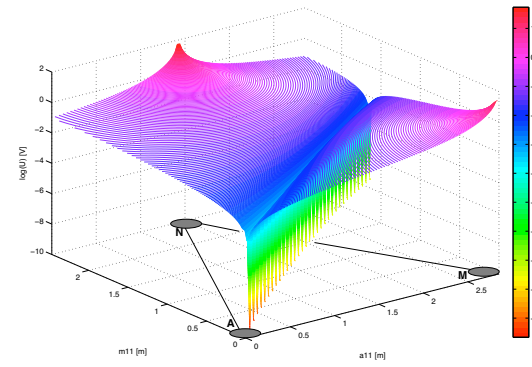


Abbildung 5: Spannung an den Potentialsensoren *M* und *N* in Abhängigkeit von der Position der Stromelektrode *B*. Die Höhe der Elektrode *B* beträgt 30 cm über dem Untergrund. Die Spannung ist in der *z*-Achse bzw. im Farbbalken (rechts von der Zeichnung) logarithmisch aufgetragen.

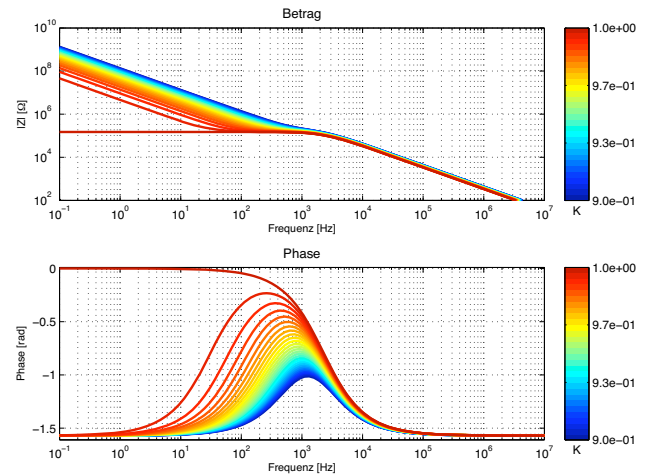


Abbildung 6: Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Geometriefaktor *K*.

Unter einer Frequenz von $f \approx 100 \text{ Hz}$ (im Betrag) bzw. $f \approx 1000 \text{ Hz}$ (in der Phase) hat der Geometriefaktor einen großen Einfluss auf die Impedanz, besonders auf die Phase. Um so die im Verlauf einer Mission gemessene Impedanz eindeutig interpretieren zu können, sollte $K \approx 1$ gelten. Ansonsten kann nicht unterschieden werden, wo die Messung von der Geometrie oder den Bodenparametern bestimmt werden.

Der *K*-Wert in Abhängigkeit von der Position der Elektrode *B* (Höhe: 30 cm) gemäß Abbildung 4 ist in Abbildung 7 einzusehen. Der Geometriefaktor variiert hier von $K = 0,9 - 1$, Werte unterhalb von 0,9 sind nicht mehr dargestellt.

Je weiter sich die Stromelektrode *B* von *A* entfernt, desto geringer wird auch der Geometriefak-

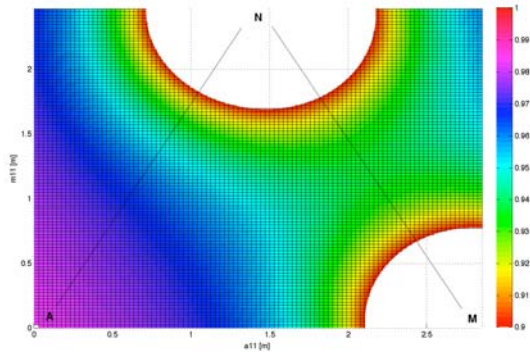


Abbildung 7: Geometriefaktor in Abhängigkeit von der Position der Stromelektrode B (vergleiche Abbildung 4). Die Positionen der drei anderen Elektroden sind eingezeichnet. Der K-Wert zur jeweiligen Position von B ist im Farbbalken kodiert. Im weißen Bereich sinkt der K-Wert unter 0,9 und ist nicht mehr dargestellt.

tor. Um die vierte Elektrode so an den Lander anzubringen, dass die Ergebnisse eindeutig interpretiert werden können, sollte die Elektrode B möglichst auf der Verbindungslinie \overline{AN} , jedoch nah an A positioniert werden. Auch das Spannungssignal ist an dieser Stelle nicht kritisch (vergleiche Abbildung 5).

4.2 Die Doppel-Elektroden-Konfiguration

Ein anderer Vorschlag ist, jeweils zwei ERIC-Elektroden unter die mit ca. 46 cm Durchmesser relativ großen Lander-Füße zu befestigen. Dies ist schematisch in Abbildung 8 einzusehen.

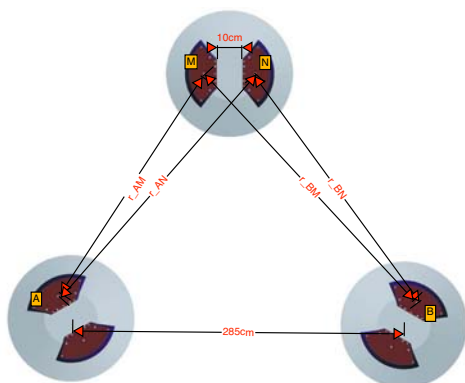


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Elektroden-Geometrie. Jeweils zwei Elektroden befinden sich unter einem Lander-Fuß (nicht maßstabgetreu).

Für diese Konfiguration wurde die Spannung an den Potentialelektroden auf Grund des frequenzabhängigen Stromes errechnet, was in Abbildung

9 abgebildet ist.

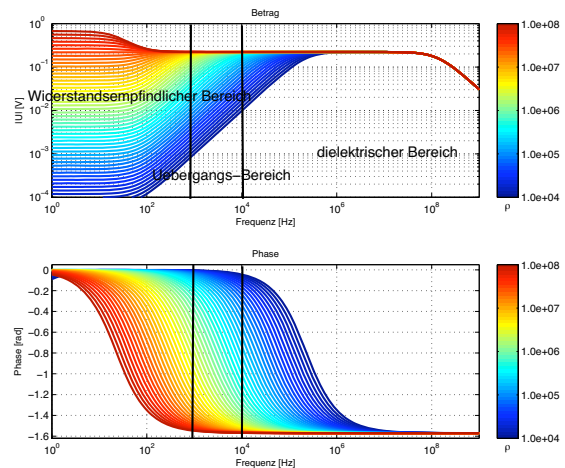


Abbildung 9: Betrag und Phase der an den Potentialelektroden gemessenen Spannung über der Frequenz. Zusätzlicher Parameter: spezifischer Widerstand des Bodens. Annahme: $\epsilon_r = 7$.

Für das Verhalten des spezifischen Widerstandes bzw. der Permittivität in Abhängigkeit von der Frequenz gilt folgende Beziehung:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - i \frac{1}{\rho \omega} . \quad (6)$$

Im unteren Frequenzbereich von Abbildung 9 (für einen spezifischen Widerstand von $\rho = 10^6 \Omega m$ erstreckt sich dieser Bereich bis ca. 5 kHz) zeigt der Betrag der Spannung einen konstanten Verlauf, welcher für verschiedene spezifische Widerstände auch verschiedene (konstante) Spannungsbeträge annimmt. Dies ist der Bereich, bei welchem die Messergebnisse durch den Widerstand des Untergrundes bestimmt werden. Hier dominiert der Widerstands- bzw. Leitfähigkeitsterm $1/(\rho \omega)$ den dielektrischen Term. In diesem Regime ist die Phase Null und somit kann, wenn die Elektroden nah am Untergrund sind ($K \approx 1$), die Theorie der DC-Geoelektrik angewandt werden und der Gleichstromgeometriefaktor Verwendung finden.

In einem mittleren Übergangs-Frequenzbereich (bei $\rho = 10^6 \Omega m$ $f \approx 10 kHz$) ist die Spannung sehr empfindlich. Eine Unterscheidung auf Grund des Widerstandes ist hier nicht mehr eindeutig gegeben. Besonders empfindlich ist hier die Phase, welche in dieser Region beginnt, gegen $-\pi/2$ abzufallen, sich aber noch bei $-\pi/4$ befindet. Dieser Punkt, an welchem die Phase

ihren maximalen Gradienten erreicht, stimmt mit dem Bereich überein, an welchem im Betrag ein asymptotischen Anstieg gegen eine dritten Bereich beginnt (der Anstieg ist eine Folge des mit der Frequenz größer werdenden Stromflusses im Boden). Dieser hier beschriebene Übergangsbereich ist von dem Widerstand des Untergrundes und der Frequenz abhängig. Je höher der Widerstand des Untergrundes ist, desto weiter verschiebt sich das Übergangsregime zu geringen Frequenzen. Physikalisch entspricht dieser Bereich der Situation, in welcher der dielektrische Term (zweiter Ausdruck auf der rechten Seite von Gleichung 6) und der Widerstands-Term (erster Ausdruck auf der rechten Seite von Gleichung 6) sich in der gleichen Größenordnung befinden.

Bei hohen Frequenzen ist der Betrag der Spannung auf Grund des spezifischen Widerstandes im Boden nicht mehr unterscheidbar (bei $\rho = 10^6 \Omega m$ ab einer Frequenz von $f \approx 10 kHz$). Die Phase beträgt $-\pi/2$. Hier dominiert der dielektrische Term ($\epsilon_0 \epsilon_r$) gegenüber der Leitfähigkeit. Die Spannung ist hier empfindlich gegenüber der relativen Permittivität, was in Grafik 10 deutlich an der Auffächerung der Spannung für verschiedene ϵ_r -Werte zu erkennen ist. Auch der Übergang zum dielektrischen Bereich ist eine Funktion der Frequenz und des Widerstandes. Je größer der Widerstand ist, desto eher bestimmt die Permittivität die Messergebnisse und ist selbst ermittelbar.

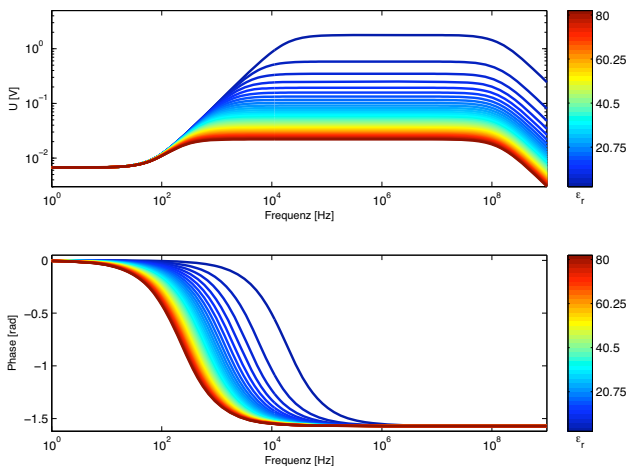


Abbildung 10: Betrag und Phase der an den Potentialelektroden gemessenen Spannung über der Frequenz in Abhängigkeit von der Permittivität. Der Widerstand ist zu $\rho = 10^6 \Omega m$ angenommen.

Der kritische Frequenzbereich für einen zu

erwartenden spezifischen Widerstand von $\rho = 10^6 \Omega m$ liegt bei ca. $10 kHz$. Um diese Frequenz sollten möglichst viele Messungen durchgeführt werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Annahmen der ROSETTA-Mission, bei welcher auch bei einer Frequenz von $10 kHz$ eine Sensitivität zur Permittivität erwartet wird [Seidensticker et al., 2007]. Da der Messbereich des ERIC-Experimentes von $10 Hz$ bis $100 kHz$ geplant ist, sollten sowohl Messungen im widerstands-sensitiven- als auch im dielektrischen Bereich durchgeführt werden können. ERIC kann somit den Widerstand und die Permittivität des Phobos-Untergrundes bestimmen.

5 Der Stromfluss im Lander und im Boden

Der über die ERIC-Elektroden in den Phobos-Boden eingespeiste Strom ist für die Durchführbarkeit des Experimentes ein kritischer Parameter. Gleichzeitig muss der Stromfluss im Phobos-Lander auf Grund der einzelnen ERIC-Komponenten gering gehalten werden. Diese beiden kritischen Aspekte werden mit Hilfe des Ersatzschaltbildes in Abbildung 11 untersucht.

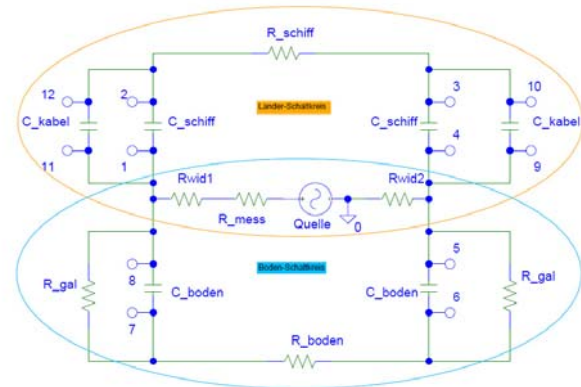


Abbildung 11: Ersatzschaltbild um den Stromfluss im Untergrund und im Lander zu ermitteln

Die orangene Ellipse umschließt die Lander-Schleife, die blaue Ellipse die Boden-Schleife.

Nur wenn genügend Strom in den Untergrund gelangt, kann an den Potentialelektroden eine Spannung gemessen werden. Die Kapazität der ERIC-Elektroden C_{boden} zum Untergrund muss also möglichst groß sein. Um den Stromfluss im Phobos-Boden zu maximieren, werden die ERIC-Elektroden nicht isoliert und lassen so zusätzlich einen galvanischen Stromfluss zu (charakterisiert

durch R_{gal}).

Da die Lander-Füße miteinander verbunden sind, muss der galvanische Stromfluss zwischen Elektrode dem Lander-Fuß hingegen durch einen Isolator unterbunden werden. Dies verhindert auf Grund der verwendeten Frequenzen jedoch nicht, dass die Elektrode nicht nur einen Strom in den Boden einspeist, sondern auch kapazitiv mit den Lander-Füßen wechselwirkt. Elektrode und Lander-Fuß bilden somit einen Kondensator C_{schiff} mit dem Isolationsmaterial als Dielektrikum. Um den Stromfluss im Lander gering zu halten, wird hier eine 5 mm dicke PEEK-Vakuum-Konstruktion (PEEK: *Polyetheretherketon*) vorgeschlagen, welche ein geringe Permittivität, sehr wenig Gewicht besitzt und in Abbildung 12 dargestellt ist.

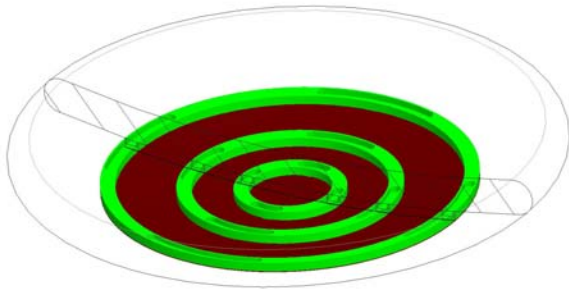


Abbildung 12: PEEK-Vakuum-Konstruktion zur Minimierung des Stromflusses im Phobos-Lander auf Grund kapazitiver Wechselwirkungen der Elektroden mit den Lander-Füßen. Grün: PEEK-Ringe, braun: ERIC-Elektrode.

Hinzu kommt noch eine Wechselwirkung der Koaxial-Kabel (C_{kabel}). Die Werte der Übergangswiderstände und Kapazitäten der Elektroden wurden in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Untergrundes errechnet (vergleiche Hördt [2007]) und der Strom mit Hilfe des Programms PSPICE bestimmt. In Abbildung 13 ist sowohl der effektive Strom im Lander- als auch im Phobos-Boden für eine angelegte Spannung von $U_{Quelle} = 28 V$ dargestellt. Die Kabelkapazitäten wurden zu $C_{Kabel,1m} = 40 pF/m$ angenommen.

Um den Strom mit PSPICE zu ermitteln wurde der Strom in R_{boden} und R_{schiff} simuliert, was in Abbildung 13 dargestellt ist. Der eingekoppelte Strom im Boden ist auf Grund der größeren Kapazität der Elektroden zu den Lander-Füßen um ca. eine Größenordnung geringer als der Strom im

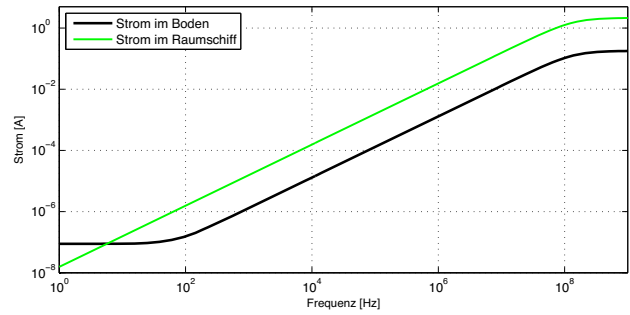


Abbildung 13: Strom als Funktion der Frequenz, berechnet mit dem Schaltbild in Abbildung 12.

Lander. Allerdings befindet sich der Stromfluss im Lander auf Grund des ERIC-Experimentes nicht in einem kritischen Bereich und es gelangt genügend Strom in den Boden, um Messungen durchführen zu können. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass die Annahmen in dieser Arbeit konservativ sind, und somit in der Realität ein noch besseres Ergebnis erwartet wird. Die Messelektronik wird jedoch einen Stromfluss größer als $I \approx 10 mA$ nicht unterstützen, was eine frequenzlimitierung von $f < 10^6 Hz$ zur Folge hat. In diesem Frequenzbereich muss das ERIC-Experiment jedoch keine Messungen durchführen, da hier keine neuen Informationen über den Untergrund gewonnen werden (vergleiche Abbildung 9 und 10).

6 Vergleich mit Testmessungen an einem Versuchsaufbau

Im Verlaufe dieser Arbeit wurde eine Versuchsaufbau gebaut, um die theoretischen Betrachtungen durch Experimente zu ergänzen und zu verifizieren. Dieser Versuchsaufbau besteht aus einem Sandkasten, in welchen verschiedene Materialien eingefüllt werden können. Dieser Sandkasten ist komplett aus Holz gefertigt und so ausgelegt, dass auch Messungen in einer Eiskammer oder mit Wasser durchgeführt werden können (Abbildung 14). Auf diesem Bild ist am linken Rand noch die zweite Komponente des Versuchsaufbau, ein Multikanal-Impedanzspektrometer zur Bestimmung der Impedanz zu erkennen.

Testmessungen sowohl mit kontrollierbaren Schaltkreisen, als auch am Sandkasten wurden durchgeführt. In Grafik 15 ist ein Vergleich zwischen theoretisch bestimmten Verläufen und einer Messung dargestellt. Die Elektrodenanordnung für diese Messung ist derjenigen von Abbildung 8



Abbildung 14: Sandkasten zum Untersuchen eines Probedodens.

nachempfunden. Der Abstand der Potentialelektroden wurde hier zu $r_{MN} = 10 \text{ cm}$, $r_{AB} = 80 \text{ cm}$ und $r_{AM} = 60 \text{ cm}$ und gewählt.

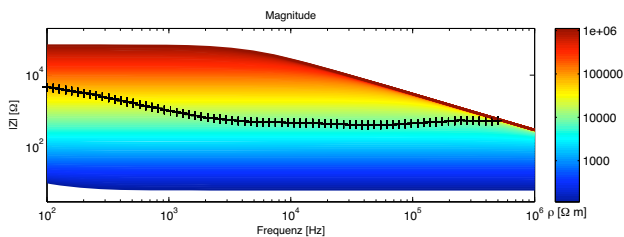


Abbildung 15: Impedanz als Funktion der Frequenz und des spezifischen Widerstandes. Die schwarzen Kreuze charakterisieren die Ergebnisse der Impedanzmessung mit kapazitiven Elektroden im Sandkasten.

Die Betragsmessung ist über einen großen Frequenzbereich konstant (von ca. $3 - 500 \text{ kHz}$). In diesem Bereich stimmt der gemessene Verlauf des kapazitiv ermittelten Betrages mit einem theoretisch zu erwartenden Ergebnissen von ca. $7 - 10 \text{ k}\Omega\text{m}$ überein (nicht dargestellt).

Weitere Messungen auf hochohmigen Untergründen (Eis, Sand) mit den ERIC-Komponenten müssen noch durchgeführt werden.

7 Schlußfolgerung

Mit Hilfe der kapazitiven ERIC-Elektroden ist es auch mit der Präsenz des Landers möglich, einen ausreichenden Strom in den Untergrund des Phobos-Mondes einzuspeisen. Hierzu wurde der Lander und der Boden des Phobos in einem Ersatzschaltbild simuliert. Das Spannungssignal an den Potentialelektroden ist auch bei Erhöhung

einer der vier Elektroden noch messbar.

Zwei Konstruktionen der Elektroden-Anbringung wurden diskutiert und mit beiden ist es möglich, die Untergrundparameter spezifischer Widerstand und dielektrische Permittivität im Rahmen der Phobos-Mission zu bestimmen. Hier ist die verwendete Frequenz von Wichtigkeit.

Erste Messungen ergeben eine gute Übereinstimmung mit dem zu erwartenden Verhalten kapazitiver Elektroden.

Literatur

- J. C. Cook. An electrical crevasse detector. *Geophysics*, 21, 1956. An electrical crevasse detector.
- R. Grard. A quadrupolar array for measuring the complex permittivity of the ground: application to earth prospecting and planetary exploration. *Meas. sci Technol.*, 1:295–301, 1990a.
- R. Grard. A quadrupole system for measuring in situ the complex permittivity of materials: application to penetrators and landers for planetary exploration. *Meas. sci Technol.*, 1:801–806, 1990b.
- A. Hördt. Contact impedance of grounded and capacitive electrodes. EMTF 2007, 2007.
- Oliver Kuras. *The Capacitive Resistivity Technique for Electrical Imaging of the Shallow Subsurface*. PhD thesis, University of Nottingham, Nottingham, 2002.
- Erik Pennewitz. Untersuchungen zur entwicklung und anwendung eines elektrischen bodenexperimentes auf körpern des sonnensystems. Master's thesis, Technische Universität Braunschweig, 2008.
- K. J. Seidensticker, D. Möhlmann, I. Apathy, W. Schmidt, K. Thiel, W. Arnold, H. H. Fischer, M. Kretschmer, D. Madlener, A. Peter, R. Trautner, and S. Schieke. Sesame - an experiment of the rosetta lander philae: Objectives and general design. *Space Science Reviews*, 128: 301 – 337, 2007.