

# SIP-Messungen mit unterschiedlichen Salzlösungen steigender Konzentration an Sandsteinen

Katrin Breede, Andreas Weller  
Institut für Geophysik, TU Clausthal

**Stichworte:** Spektrale induzierte Polarisation, Sandsteine, Salzlösungen, Tonminerale

## I. EINLEITUNG

Im Rahmen eines Projektes zwischen der University of Birmingham und dem Institut für Geophysik der Technischen Universität Clausthal wurden Messungen der spektralen induzierten Polarisation an unterschiedlichen Sandsteinen durchgeführt. Für die Messungen wurde eine Messapparatur des Typs SIP-Fuchs (Fa. Radic Research, Berlin) und eine Vierelektrodenmesszelle genutzt [1]. Die Sandsteinproben wurden mit zwei unterschiedlichen Fluiden gesättigt. Bei den Messungen in Birmingham kam eine synthetische Lösung, welche die gleiche chemische Zusammensetzung wie das Birminghamer Grundwasser hatte, zum Einsatz. Für die Untersuchungen an der Technischen Universität Clausthal wurde Leitungswasser verwendet. Diese beiden Fluide unterscheiden sich in der elektrischen Leitfähigkeit etwa um den Faktor 7, wobei das Clausthaler Leitungswasser mit einer Leitfähigkeit von ungefähr 10 mS/m eine deutlich geringere Leitfähigkeit als das „Birminghamer Grundwasser“ hat. Dieser Unterschied in der Leitfähigkeit des Sättigungsfluids machte sich auch in den Messungen der spektralen induzierten Polarisation bemerkbar. So lag der spezifische elektrische Widerstand bei den Messungen in Clausthal immer deutlich über jenem, welcher bei den Messungen in Birmingham erhalten wurde. Es konnten nicht nur Unterschiede in den Spektren des spezifischen elektrischen Widerstandes festgestellt werden, sondern auch in den entsprechenden Phasenspektren. Hierbei konnte kein einheitlicher Trend festgestellt werden [2]. Bei der Probe Bk (roter Sandstein) ergab sich bei den Messungen mit dem Clausthaler Leitungswasser ein Phasenmaximum, während die Messungen mit dem „Birminghamer Grundwasser“ einen konstanten Phasenwinkel zeigten. Bei den meisten Proben wurde jedoch mit beiden Sättigungsfluiden ein Phasenmaximum gemessen, welches sich allerdings in der Intensität und teilweise auch in der Frequenz unterschied.

Auf Grund der sehr unterschiedlichen Ergebnisse sollten im Rahmen einer Diplomarbeit Messungen der spektralen induzierten Polarisation mit unterschiedlichen Salzlösungen als Sättigungsfluid an ausgewählten Sandsteinproben durchgeführt werden.

## II. MESSVORGANG

Für die SIP-Messungen wurden die Festgesteine zuerst bei ungefähr 35 °C getrocknet und anschließend mit dem gewünschten Sättigungsfluid in einem Exsikkator unter Vakuum gesättigt. Danach wurden die Proben ungefähr eine Woche in der Lösung stehen gelassen, damit sich ein chemisches Gleichgewicht zwischen der Sandsteinprobe und dem Sättigungsfluid einstellen konnte. Anschließend wurden jeweils mindestens zwei Messungen an aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt.

Als Salzlösungen wurden Natrium-, Kalzium-, Kalium- und Aluminiumchloridlösungen verwendet. Die Konzentration wurde dabei schrittweise von 500 ppm bis 8000 ppm verdoppelt. Für die Messungen mit den unterschiedlichen Salzlösungen wurden Schwesterproben verwendet, so dass jede Sandsteinprobe nur mit einer Salzionenart in Berührung kam.

Die SIP-Messungen wurden an folgenden Proben durchgeführt:

- GR = Glaukonitführender Grünsandstein,
- Bu3 = Feinsandig-siltiger Buntsandstein,
- Bu12 = Roter Fein-Sandstein (Arkose),
- Bk9 = Roter Sandstein (äolisch-fluviatile Fazies),
- Bs4 = Grob-Sandstein ,
- BR5 = mittel-triassischer roter Sandstein und
- BH7 = Bentheimer Sandstein.

Die Proben wurden anhand ihrer unterschiedlichen Phasenspektren von früheren SIP-Messungen ausgewählt und unterscheiden sich sowohl in ihrer mineralogischen Zusammensetzung als auch in ihren petrophysikalischen Eigenschaften.

Zusätzlich zu den durchgeführten Messungen der spektralen induzierten Polarisation wurden auch noch verschiedene mineralogische (Dünnschliffe und REM) und petrophysikalische (Dichte, Porosität, magnetische Suszeptibilität, NMR und teilweise auch innere Oberfläche und Permeabilität) Untersuchungen durchgeführt.

### III. MINERALOGISCHE UND PETROPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN DER PROBE GR

Die Messergebnisse sollen exemplarisch an der Probe GR dargestellt werden. Hierbei handelt es sich um einen glaukonitführenden Grünsandstein aus der Oberkreide. Der Sandstein stammt aus der Münsteraner Bucht. Seine mineralogische Zusammensetzung besteht zu etwa 90 % aus Quarz und etwa 10 % aus grünem Glaukonit. Die einzelnen Körner werden von Quarz-Zement zusammengehalten. Die gute Sortierung und hohe textuelle Reife des Gesteins weisen auf einen weiten Transportweg hin. Aufgrund des in der Probe vorkommenden grünen Glaukonits steht fest, dass sich das Gestein im flachmarinen Bereich gebildet hat. Die langgestreckten bis übergroßen Poren führen zu einer sehr hohen Porosität (25 %) und Permeabilität (1 Darcy) des Gesteins. Der in der Probe enthaltene Glaukonit sorgt für eine – für Sandsteine gesehen – recht hohe Korndichte von  $2,8 \text{ g/cm}^3$ .

Teilweise ist der Glaukonit in der Probe zu Eisenhydroxiden oxidiert.

In dem Sandstein sind verschiedene Tonminerale enthalten:

- Pore-lining Montmorillonit,
- engständiger Corrensit und
- Mixed-layer: Smektit-Illit.

Die Tonminerale befinden sich an den Kornoberflächen (pore-lining), wodurch sie einen starken Einfluss auf die Polarisierbarkeit des Gesteins haben [3]. Hierbei handelt es sich um Membranpolarisation [4]. Möglicherweise sind die Eisenhydroxide genauso wichtig für die Polarisierbarkeit wie die an der Grenzfläche zwischen Porenraum und Körnern befindlichen Tonminerale.

### IV. MESSUNGEN MIT VERSCHIEDENEN SALZKONZENTRATIONEN

Die Messergebnisse werden für die zuvor beschriebene Probe GR dargestellt. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse für die Messungen mit der Natriumchlorid-Lösung zu sehen. Abbildung 1a zeigt die Amplitude des spezifischen elektrischen Widerstandes in  $\Omega \text{ m}$ . Es ist zu erkennen, dass der Widerstand der Probe mit zunehmender Salzkonzentration abnimmt. Dies ist damit zu erklären, dass bei Sedimentgesteinen die elektrische Leitfähigkeit – also der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes – im Wesentlichen von der Leitfähigkeit des Porenfluids bestimmt wird. Mit zunehmender

Salzkonzentration nimmt die Anzahl der Ionen im Porenfluid zu, wodurch eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit erzielt wird.

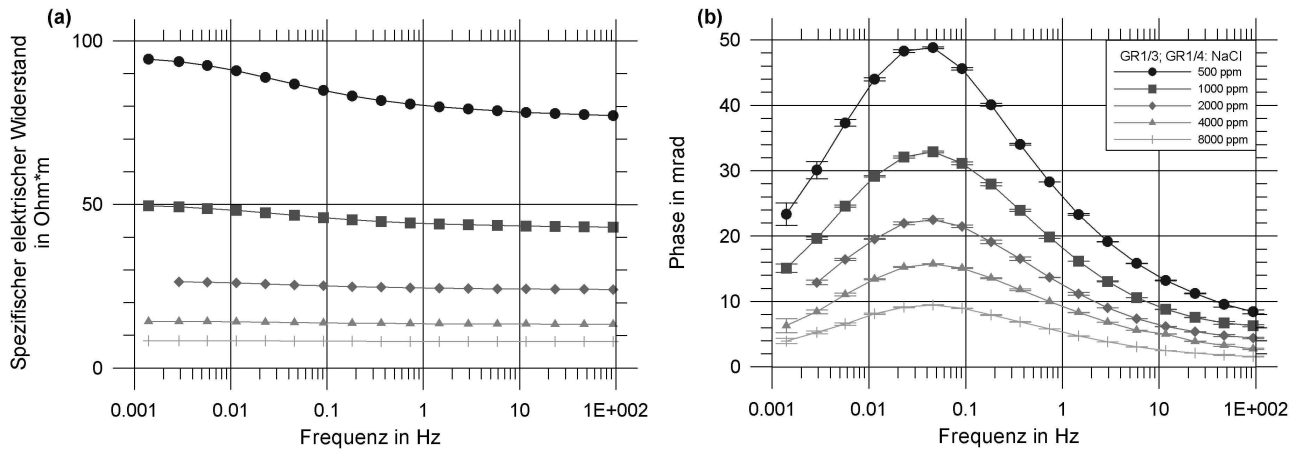


Abbildung 1: (a) Spezifischer elektrischer Widerstand. (b) Spektren der Phasenverschiebung der Probe GR für die Messungen mit Natriumchlorid.

Die Probe GR weist für die Messungen mit Natriumchlorid für alle Konzentrationen ein Phasenmaximum bei einer Frequenz von ungefähr 0,05 Hz auf (siehe Abbildung 1b). Mit zunehmender Salzkonzentration nimmt die Intensität des Maximums von etwa 50 mrad bei 500 ppm auf etwa 10 mrad bei 8000 ppm ab.

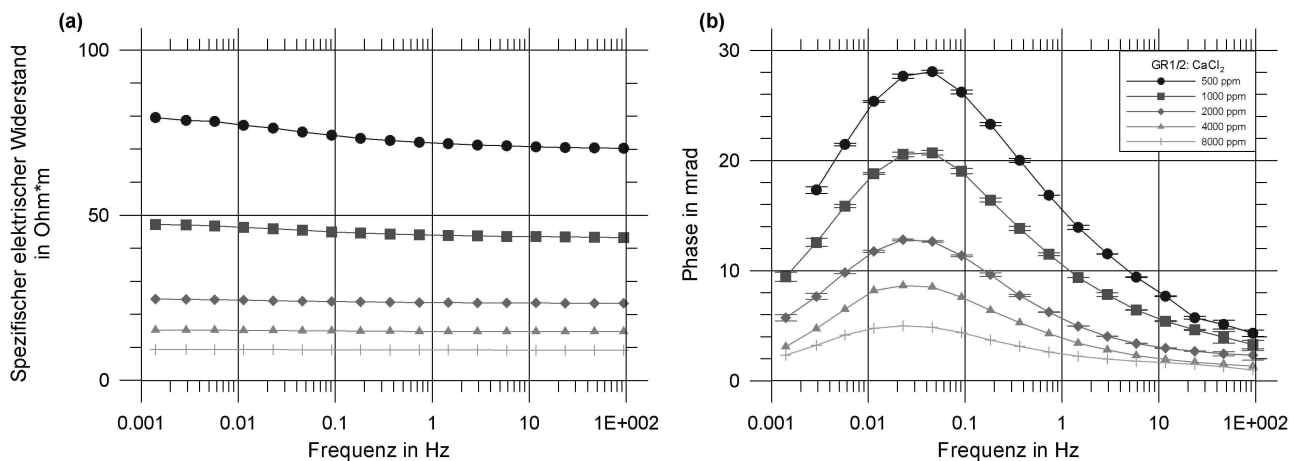


Abbildung 2: (a) Spezifischer elektrischer Widerstand. (b) Spektren der Phasenverschiebung der Probe GR für die Messungen mit Kalziumchlorid.

Bei den Spektren der Phasenverschiebung für die Kalziumchlorid-Lösung (Abbildung 2b) sind für alle Konzentrationen Phasenmaxima zu verzeichnen, welche allerdings eine geringere Intensität als diejenigen der Natriumchlorid-Messungen (Abbildung 1b) aufweisen. So liegt bei den Messungen mit 500 ppm Kalziumchlorid die Intensität des

Phasenmaximums bei nur 28 mrad im Vergleich zu knapp 50 mrad bei den Messungen mit Natriumchlorid. Bei 8000 ppm Kalziumchlorid ist die Intensität des Phasenmaximums auf etwa 5 mrad abgesunken. Im Gegensatz zu den Messungen mit Natriumchlorid liegt das Phasenmaximum nicht für alle Kalziumchlorid-Konzentrationen bei der gleichen Frequenz, sondern es findet eine Verschiebung von 0,05 Hz bei 500 und 1000 ppm Kalziumchlorid zu einer Frequenz von 0,02 Hz bei den Konzentrationen 2000 bis 8000 ppm statt.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse für die Messungen mit Kaliumchlorid dargestellt. Die spezifischen elektrischen Widerstände (Abbildung 3a) liegen für die jeweiligen Kaliumchlorid-Konzentrationen bei vergleichbaren Werten wie bei den Messungen mit Natrium- und Kalziumchlorid.

Für alle Konzentrationen der Kaliumchlorid-Lösung zeigen die SIP-Messungen ein Phasenmaximum, welches wie bei Natrium- und Kalziumchlorid mit zunehmender Konzentration in der Intensität abnimmt. Die Intensität der Phasenpeaks ist für alle Konzentrationen nahezu genauso groß wie bei den Messungen mit Kalziumchlorid.

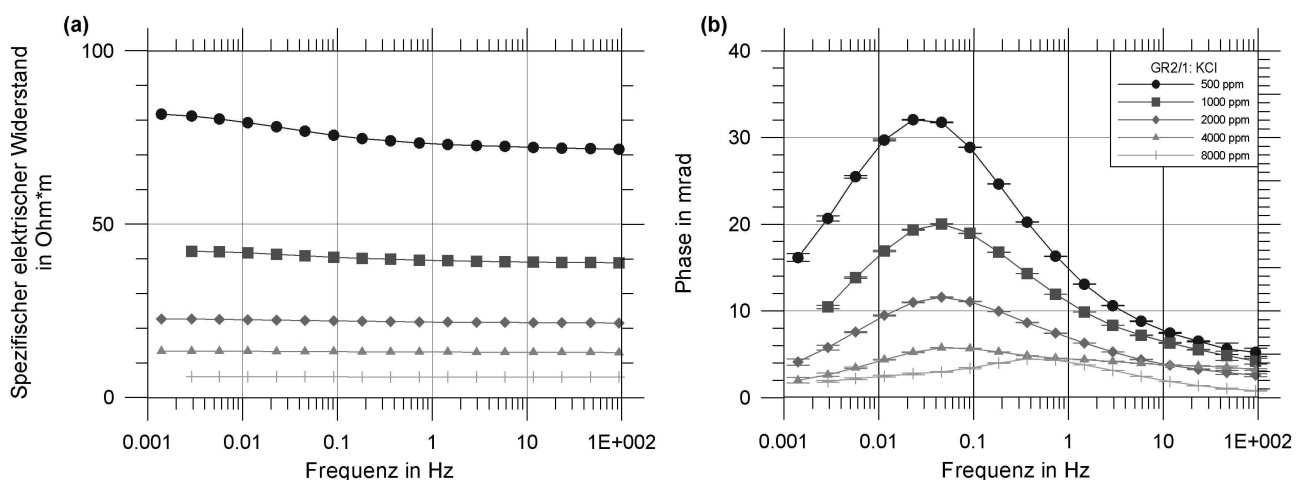


Abbildung 3: (a) Spezifischer elektrischer Widerstand. (b) Spektren der Phasenverschiebung der Probe GR für die Messungen mit Kaliumchlorid.

Auch bei den Messungen mit Kaliumchlorid findet eine Verlagerung des Phasenmaximums statt. Im Gegensatz zu den Messungen mit Kalziumchlorid verschiebt es sich mit zunehmender Salzkonzentration zu größeren Frequenzen hin. Bei 500 ppm befindet sich das Maximum bei einer Frequenz von 0,02 Hz, für die Konzentrationen 1000 bis 4000 ppm bei 0,05 Hz und für 8000 ppm Kaliumchlorid sogar bei 0,37 Hz.

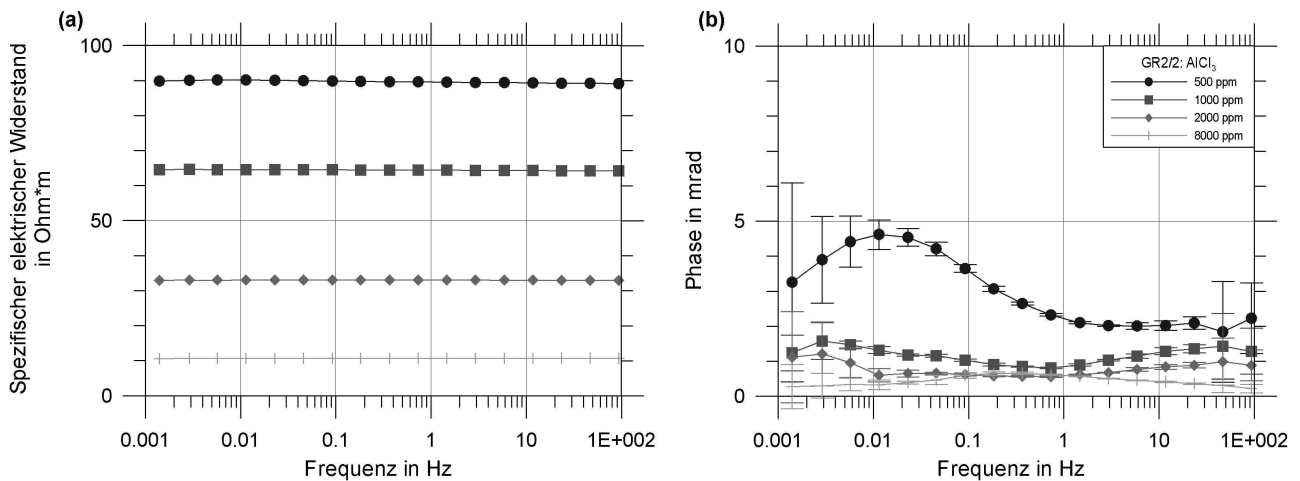


Abbildung 4: (a) Spezifischer elektrischer Widerstand. (b) Spektren der Phasenverschiebung der Probe GR für die Messungen mit Aluminiumchlorid.

Die Ergebnisse für die SIP-Messungen mit Aluminiumchlorid unterscheiden sich sowohl im spezifischen elektrischen Widerstand (Abbildung 4a) als auch im Phasenwinkel (Abbildung 4b) wesentlich von denjenigen mit den anderen Salzlösungen.

In den Spektren der Phasenverschiebung tritt bei den Messungen mit Aluminiumchlorid nur bei der kleinsten Konzentration (500 ppm) ein Phasenmaximum auf, welches eine Intensität von nur 5 mrad besitzt. Verglichen mit den Messungen der anderen Salzlösungen beträgt die Intensität des Maximums nur 1/6 bis 1/10. Für die Messungen mit 1000 bis 8000 ppm Aluminiumchlorid ist ein nahezu konstanter aber fast vernachlässigbarer Phasenwinkel zu verzeichnen.

Um noch mehr Aussagen über die gemessenen Proben machen zu können, wurden der Real- und Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit gegen die Leitfähigkeit des Porenfluids ( $\sigma_w$ ) aufgetragen. Der Realteil ( $\sigma'$ ) wird im Wesentlichen durch die Volumenleitfähigkeit des Gesteins bestimmt, während der Imaginärteil ( $\sigma''$ ) ein Maß für die Polarisierbarkeit des Gesteins ist.

In Abbildung 5a ist der Realteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit der Probe GR gegen die Leitfähigkeit des Porenfluids aufgetragen. Mit zunehmender Leitfähigkeit des Porenfluids nimmt auch die Volumenleitfähigkeit des Gesteins zu, weshalb für alle Salzlösungen eine Gerade zu erkennen ist.

Die Gerade für die Messungen mit Aluminiumchlorid weicht von denjenigen der übrigen Messungen ab. Dies ist damit zu erklären, dass bei der Lösung von Aluminiumchlorid in Wasser Aluminiumhydroxid ausfällt. Hierdurch steht ein Teil der ursprünglich in der Lösung enthaltenen Aluminiumionen nicht mehr als Ladungsträger zur Verfügung. Bei der

Reaktion von Aluminiumchlorid mit Wasser werden Wasserstoff-Ionen freigesetzt, was zu einer Reduzierung des pH-Wertes führt. Dies konnte für unsere Messungen auch nachgewiesen werden: der pH-Wert lag im Gegensatz zum Clausthaler Leitungswasser (pH-Wert von 7) nur bei 3,5.

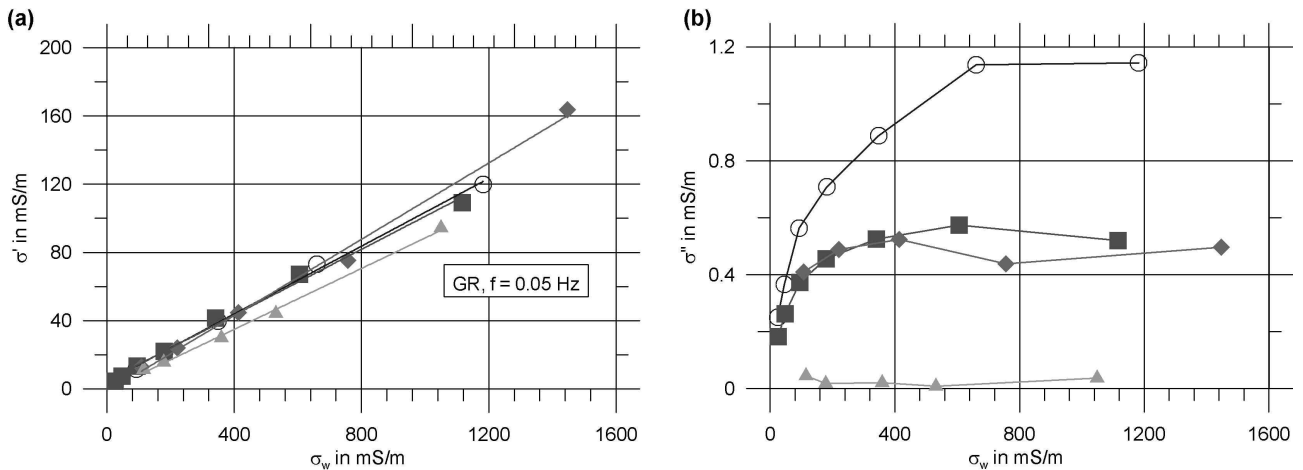


Abbildung 5: (a) Realteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit gegen Leitfähigkeit des Porenfluids. (b) Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit gegen Leitfähigkeit des Porenfluids.

Das ausgefällte Aluminiumhydroxid lagert sich in der Probe als gelartiger, amorpher Feststoff auf den Kornoberflächen ab. Dies führt zu einer signifikanten Reduzierung der Polarisierbarkeit des Gesteins, was sich auch im verschwindend geringen Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit (Abbildung 5b) widerspiegelt.

Anhand der Abbildung 5b ist zu erkennen, dass die Polarisierbarkeit der Probe mit zunehmender Leitfähigkeit des Porenfluids für Natrium- und Kalziumchlorid zunächst stark ansteigt, bis schließlich ein Sättigungszustand erreicht wird. Der Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit ist für die Messungen mit Natriumchlorid am stärksten. Etwa um den Faktor zwei kleiner ist die Polarisierbarkeit für Kalzium- und Kaliumchlorid. Aufgrund der höheren Ladungszahl wird Kalzium stärker als Natrium in der elektrischen Doppelschicht gebunden, was zu einer geringeren Polarisierbarkeit führt. Kalium ist zwar genauso wie Natrium einwertig, allerdings passt es auf Grund seines Ionenradius sehr gut in die Gitterstruktur der in der Proben enthaltenen Tonminerale, was wiederum dafür sorgt, dass die Kaliumionen eine geringere Mobilität als die Natriumionen aufweisen. Folglich ist die Polarisierbarkeit bei den Messungen mit Kaliumchlorid geringer.

## V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Messungen haben gezeigt, dass sowohl der spezifische elektrische Widerstand als auch die Phasenverschiebungen im starken Maß von der chemischen Zusammensetzung des Porenfluids abhängen. Mit zunehmender Konzentration nahm für alle Salzlösungen sowohl der spezifische elektrische Widerstand als auch die Intensität des Phasenmaximums ab. Die verschiedenen Salzionenarten führten zu Unterschieden in der Intensität des Phasenmaximums.

Mit zunehmender Leitfähigkeit des Porenfluids nimmt auch die Volumenleitfähigkeit des Gesteins zu, da bei Sedimentgesteinen die elektrische Leitung zum größten Teil im Porenfluid stattfindet.

Der Imaginärteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit, welcher ein Maß für die Polarisierbarkeit des Gesteins ist, wird von der Ladungszahl, dem Ionenradius und von dem Chemismus des Porenfluids bestimmt.

Die Messungen sollen dahingehend weitergeführt werden, dass Lösungen mit weiteren Salzionenarten unterschiedlicher Wertigkeit zur Anwendung kommen.

## LITERATUR

- [1] N. Schleifer, A. Weller, S. Schneider, A. Junge, „Investigation of a Bronze Age Plankway by Spectral Induced Polarisation“, *Archaeological Prospection* 9, Seiten 243 - 253, 2002.
- [2] A. Weller, J.B.T. Scott, N. Schleifer und R.D. Barker, “The effect of changing the salinity of the groundwater on SIP of sandstones”, 18<sup>th</sup> SAGEEP meeting – Atlanta, Georgia, 2005.
- [3] J.B.T. Scott, “Low-frequency electrical spectroscopy of sandstone”, Ph.D.-Thesis, University of Birmingham, 2003.
- [4] D.J. Marshall & T.R. Madden, “Induced polarization, a study of its causes”, *Geophysics* 24, Seiten 790 – 816, 1959.