

Spektrale induzierte Polarisation (SIP) an Lockermaterial:

Einfluss von Einbaumethodik, Feinkornanteil und Wassergehalt auf die Messergebnisse

Matthias Halisch, Andreas Weller
Institut für Geophysik, TU Clausthal

Stichworte: Spektrale induzierte Polarisation, Lockermaterial, Feinkornanteil, Wassergehalt, Probenpräparation

I. Einleitung

Das Verfahren der spektralen induzierten Polarisation hat in den letzten Jahren stetig an Bedeutung gewonnen und kontinuierlich neue Aufgaben- und Untersuchungsgebiete erschlossen. Neben der klassischen IP in der Erzprospektion findet man dieses Verfahren inzwischen auch in der Archäometrie, bzw. in der oberflächennahen Geophysik und Bohrlochgeophysik zur Charakterisierung von Böden und der Ableitung von deren physikalischen und geotechnischen Parametern (z.B. vom Durchlässigkeitsbeiwert [1]). Neben den Feldmessungen sind Labormessungen ein unverzichtbares Mittel, um petrophysikalische Zusammenhänge zu untersuchen. Während Festgesteinsproben im Labor recht einfach zu handhaben sind, stellen Untersuchungen an Lockermaterialien (wie gezeigt wird) höchste Anforderungen an die Probenvorbereitung und die Messtechnik.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein Kalkstein-Sand-Gemisch, wie man es üblicherweise im Straßenbau findet, mittels SIP eingehend untersucht. Dabei war vor allem wichtig, reproduzierbare und untereinander vergleichbare und aussagekräftige Messergebnisse zu erzielen. Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt wird, spiegelt dabei das „Dreigestirn“ Verdichtung, Feinkornanteil und Wassergehalt die maßgeblichen Parameter wider. Als Messapparatur wurde eine SIP-Fuchs (Fa. Radic Research, Berlin) mit einer Vierelektrodenmesszelle verwendet [2].

II. Einfluss der Einbaumethodik auf die Messergebnisse

Zunächst wurden Untersuchungen durchgeführt, um die „Grundcharakteristik“ des Materials festzustellen. Dazu wurde der im Kalkstein-Sand Gemisch enthaltene Feinkornanteil ($< 63 \mu\text{m}$) abgeschlämmt und das so gewonnene „reine“ Material untersucht. Die erste Probenserie wurde ohne besondere Einbaumethodik, das heißt ohne besondere Verdichtung (locker) in die Probenaufnehmer eingefüllt und durchgemessen.

Die Rohdichte des Materials beträgt bei dieser undefinierten Einbaumethode etwa $1,3 \text{ g/cm}^3$. Es stellte sich dabei heraus, dass das Material ähnliche, aber auch zum Teil völlig unterschiedliche Phasenspektren aufwies (Abbildung 1).

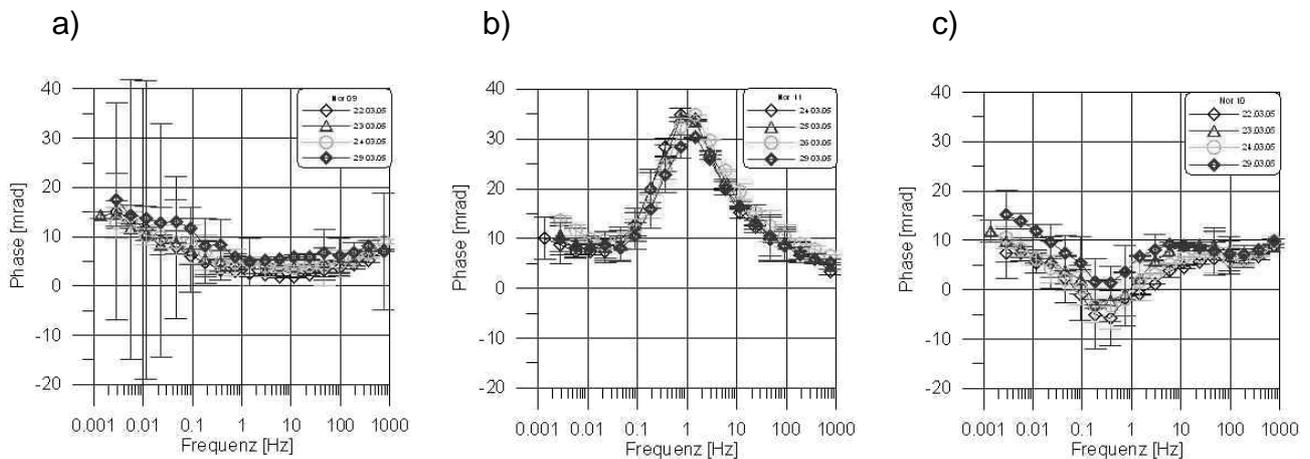


Abbildung 1: Ausgewählte Phasenspektren der ersten Probenserie (lockeres Befüllen). Deutlich zu erkennen sind die drei unterschiedlichen Kurventypen (von links nach rechts: Typ A, B, C).

Durch die lockere Schüttung des Materials weist jede Probe eine unterschiedliche Anzahl an großen und kleinen Porenraumbereichen auf. Die dargestellten Phasenspektren zeigen deutlich, dass bei undefiniertem Einbau eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse unmöglich ist. Für die zweite Probenserie wurde das Kalkstein-Sand-Gemisch daher mit einer zuvor definierten Einbaumethodik vorbereitet und danach die Phasenspektren gemessen. Das Material wurde nun immer nach folgendem Schema in die Probenbehälter eingebaut: ca. 20 mm hoch Material einfüllen, Verdichtung durch 20 leichte „Schläge“, 20 mm auffüllen, Verdichtung, usw. bis zur vollständigen Füllung des Probenbehälters. Gleichzeitig stieg die Rohdichte dabei auf etwa $1,8 \text{ g/cm}^3$ an. Die daraus resultierende deutliche Verbesserung der Reproduzierbarkeit ist in Abbildung 2 dargestellt. Während bei der ersten Probenserie unterschiedliche Kurventypen auftraten, weisen nun alle untersuchten Proben ein nahezu identisches Phasenspektrum auf. Durch die zuvor festgelegte Einbaumethodik kann sich das Material nun gleichmäßiger einregeln, wodurch auch ein ähnlich strukturierter Porenraum bei allen Proben entsteht. Dadurch erreicht man eine direkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse untereinander und – wie weitere Probenserien gezeigt haben – ebenfalls eine sehr gute Reproduzierbarkeit. Für alle nachfolgenden Untersuchungen wurde daher auf diese Art der Probenvorbereitung zurückgegriffen.

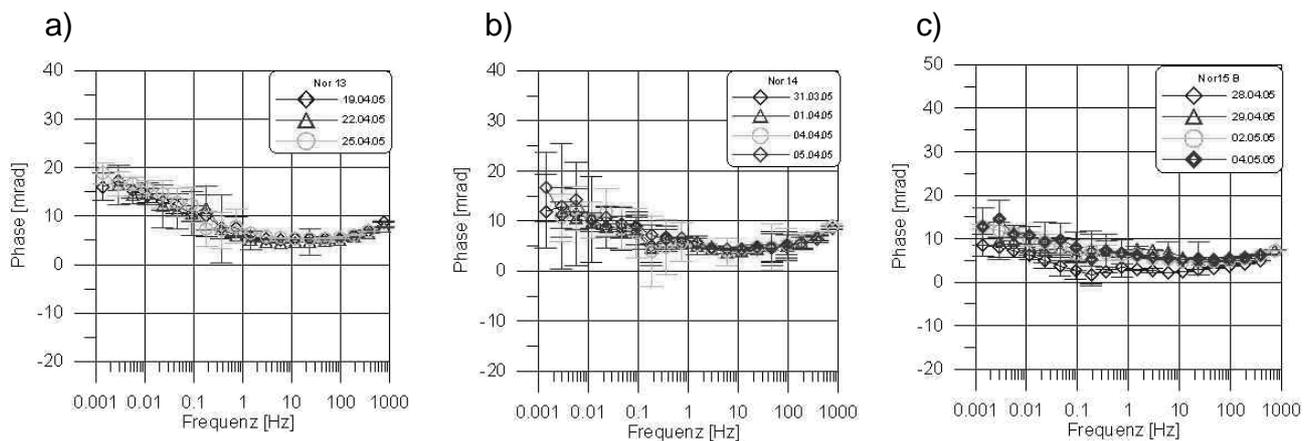


Abbildung 2: Ausgewählte Phasenspektren der zweiten Probenserie (verdichtetes Befüllen). Die unterschiedlichen Kurventypen aus Abbildung 1 sind einem nahezu identischen Kurvenverlauf gewichen. Eine direkte Vergleichbarkeit untereinander ist somit gegeben.

III. Einfluss des Feinkornanteils auf die Messergebnisse

Der nächste Schritt bestand darin, das zuvor abgeschlämmte Feinkorn dem Material wieder schrittweise zuzuführen, um somit mögliche und zu erwartende Veränderungen im Phasenverhalten zu erkennen. Das Hinzufügen des Feinkorns bewirkt eine Verkleinerung der Porengröße. Große Poren werden nach und nach aufgefüllt und die Porenhäule verkleinern sich weiter. Durch die im Material enthaltene Tonminerale werden vorhandene Polarisationsmechanismen (Membranpolarisation durch Tonpartikel und Konstriktivität des Porenraumes [3]) zusätzlich verstärkt.

Für diese Probenserie wurde der Feinkornanteil im Material in Prozentschritten (bezogen auf die Masse der Probe) erhöht: 0% - 10%, 15% und 25% als Maximalanteil. In Abbildung 3 sind einige ausgewählte Phasenspektren dieser Probenserie dargestellt, um die wichtigsten Veränderungen im Phasenverhalten zu zeigen. Die wesentlichsten Veränderungen sind dabei folgende:

- Abnahme der Phase in einem Frequenzbereich von 1 mHz bis etwa 1 Hz,
- Ausbildung eines Phasenmaximums in einem Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis 10 Hz,
- eine Abnahme der Phasenamplitude mit steigendem Feinkorngehalt im Bereich des Maximums.

Wie sind diese Veränderungen nun zu erklären? An Sandsteinen wurde gezeigt, dass sich das Phasenmaximum bei einer Verringerung der Porenhäule zu größeren Frequenzen hin verschiebt [4]. Mit zunehmendem Feinkorngehalt wird nach und nach Porenraum

aufgefüllt, die Menge an großen Poren nimmt also stetig ab und die Porenhäule verengen sich. Diese Veränderung wird deutlich sichtbar in dem Frequenzbereich von 1 mHz bis etwa 0,5 Hz. So beträgt der Phasenwert bei einer Frequenz von 1 mHz bei 0% Feinkornanteil etwa 17 mrad, bei 7% Feinkornanteil sinkt dieser bereits auf etwa 10 mrad und bei 25% Feinkornanteil beträgt der Phasenwert lediglich noch etwa 2 mrad. Dies entspricht einer Abnahme des Phasenwertes um etwa 88%. Die Ausbildung des Phasenmaximums in dem Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis 10 Hz lässt sich ebenfalls mit diesem Phänomen erklären. Da sich kleinere Porenhäule bei höheren Frequenzen abzeichnen und der Feinkornanteil stetig zunimmt, bildet sich eine neue, dominante Porenhalsgröße aus, welche sich in einer erhöhten Polarisierbarkeit in diesem Frequenzbereich widerspiegelt.

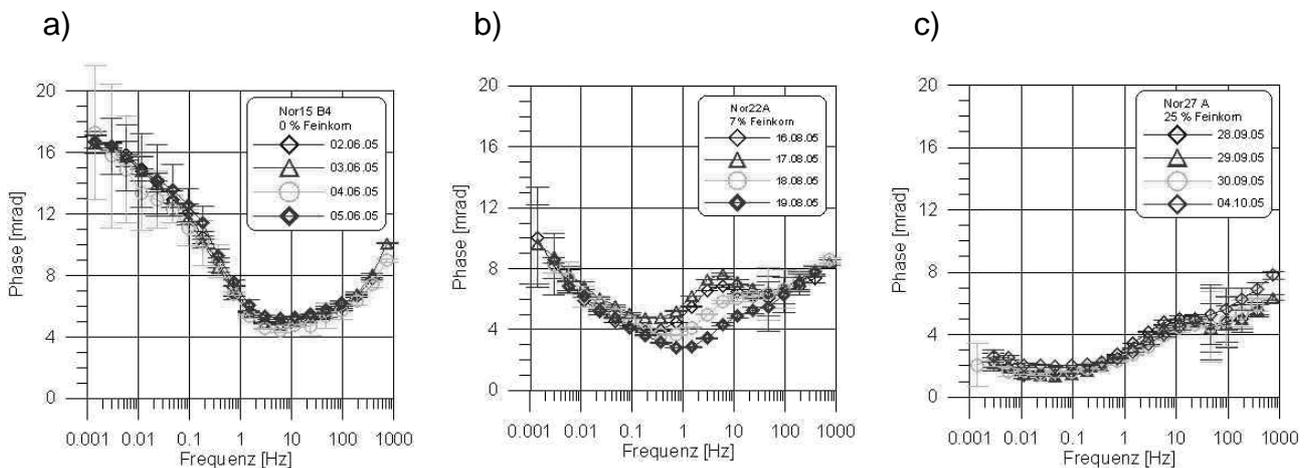


Abbildung 3: Ausgewählte Phasenspektren der dritten Probenserie (verdichtetes Befüllen, ansteigender Feinkornanteil). Von links nach rechts: 0%, 7% und 25% Feinkornanteil. Deutlich zu erkennen ist eine Abnahme der Phase in einem Frequenzbereich von 1 mHz bis etwa 1 Hz, sowie die Ausbildung eines Phasenmaximums in einem Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis 10 Hz.

Man erkennt ebenfalls, dass mit weiter zunehmendem Feinkornanteil die Amplitude dieses Phasenmaximums nicht weiter ansteigt, sondern sich markant verringert. Eine Erklärung für dieses Phänomen soll der folgende Abschnitt liefern.

IV. Einfluss des Wassergehaltes auf die Messergebnisse

Bisher wurde gezeigt, dass die Verdichtung des Lockermaterials bei SIP Messungen im Labor signifikante Änderungen im Phasenverhalten verursacht, primär hervorgerufen durch die stark variierende Porengröße. Weiterhin wurde im vorherigen Abschnitt erläutert,

mit welchen Effekten und Veränderungen im Phasenverhalten zu rechnen ist, wenn der Feinkornanteil im Probenmaterial nach und nach erhöht wird. Bei allen bisher dargestellten Untersuchungen waren die Proben vollständig mit Wasser gesättigt (Clausthaler Leitungswasser, Leitfähigkeit etwa 10 mS/m). Das nächste Problem betrifft Messungen mit unterschiedlichen Wassergehalten. Es werden Messungen unter „in situ“ Bedingungen bezüglich Feinkorn- und Wassergehalt im Labor angestrebt. Die Probenserie wurde demnach mit entsprechenden Feinkorn- und Wassergehalten, sowie der beschriebenen Einbaumethodik vorbereitet. Da rein vom Messaufbau her mit einer Zunahme des Wassergehaltes im Laufe der Messungen zu rechnen war, wurden zusätzlich vor und nach jeder Messung die Probenmassen bestimmt und verglichen. In Abbildung 4 ist der Vergleich zwischen den Phasenspektren der vollständig gesättigten sowie der im Labor hergestellten „in situ“ Probe dargestellt.

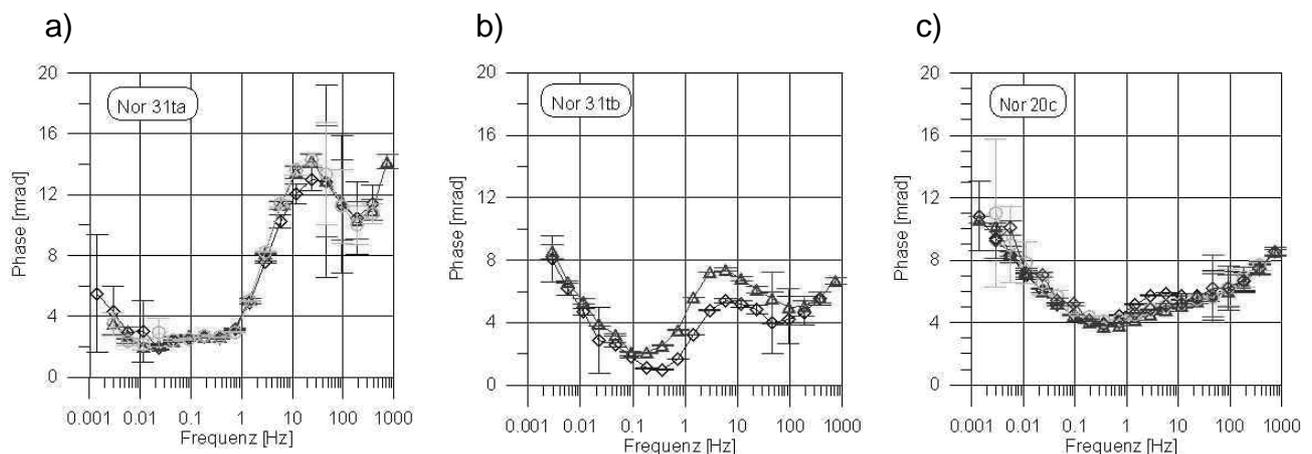


Abbildung 4: Darstellung der Phasenspektren für 5% Feinkornanteil. a) die Probe mit etwa 4,6% Anfangswassergehalt (vergleichbar Testfeld), b) bei etwa 9% Anfangswassergehalt, c) die vollständig gesättigte Probe. Deutlich zu erkennen ist die Amplitudenabnahme des Phasenmaximums mit steigendem Wassergehalt.

Klar zu sehen sind zwei signifikante Erscheinungen: einerseits eine Phasenerhöhung im niedrigen Frequenzbereich, andererseits eine Verringerung der Phase im Bereich des Maximums. Bei niedrigem Wassergehalt ist scheinbar sämtliches Wasser an die Oberflächen der kleinen Porenräume gebunden, während die großen Porenräume nahezu wasserfrei sind. In den SIP-Messungen zeigt sich dies (im Vergleich zu höheren Wassergehalten) in den höheren Phasenamplituden im Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis 100 Hz und den niedrigen Phasen bei kleinen Frequenzen. Offenbar ist die Oberflächenleitfähigkeit im kleinen Porenraum (dort wo das Feinkorn ist) für die erhöhte

Polarisierbarkeit verantwortlich. Mit zunehmendem Wassergehalt der Probe wird zunehmend der große Porenraum mit Wasser gefüllt, so dass ein Wechsel von dominanter Oberflächenleitung zu elektrolytischer Leitung im Porenraum vollzogen wird. Betrachtet man für diese Probenserie dazu auch den Imaginärteil der Leitfähigkeit, welcher ein Maß für die Oberflächenleitfähigkeit des Materials ist, wird diese These zusätzlich untermauert. Mit steigendem Wassergehalt nimmt der Imaginärteil der Leitfähigkeit und somit auch die Oberflächenleitfähigkeit deutlich ab (etwa um einen Faktor 3 von der Teil- zur Vollsättigung). Dieser Zusammenhang zeigte sich bei weiteren Untersuchungen dieser Probenserie auch bei anderen Feinkornanteilen mit unterschiedlichen Wassergehalten. Somit stellt neben der Verdichtung und dem Feinkornanteil des Lockermaterials der Wassergehalt der Proben den dritten signifikanten Parameter dar. Im Hinblick auf Vergleichsmessungen zwischen Feld- und Labor-SIP, stellen diese Untersuchungen ein wichtiges Ergebnis dar.

V. Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die drei entscheidenden Parameter bei Untersuchungen mittels spektraler induzierter Polarisation an Lockermaterialien aufgezeigt: Probenverdichtung (-einbau), Feinkornanteil und Wassergehalt. Als Untersuchungsobjekt diente ein Kalkstein-Sand-Gemisch, wie es im Straßenbau Verwendung findet. Die ersten Untersuchungen befassten sich mit der Einbaumethodik dieses Lockermaterials. Dabei zeigte sich, dass die Probenverdichtung entscheidend für die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Phasenspektren sind. Der Feinkornanteil, als zweiter wichtiger Parameter, hat maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung von Phasenanstörungen. Der Wassergehalt des Lockermaterials als weiterer wichtiger Parameter dieses „Dreigestirns“ beeinflusst direkt die Größe der Phasenverschiebung. Die bisherigen Untersuchungen sind noch nicht vollständig abgeschlossen, vor allem eine Ausweitung auf andere Lockermaterialien sollte dabei eine noch bessere Datengrundlage liefern. Im Hinblick auf den Austausch von Messergebnissen zwischen Institutionen wäre eine Vereinheitlichung bzw. Normierung der Probenvorbereitung und der Messbedingungen wünschenswert, da bisher bei Untersuchungen an Lockermaterialien kaum Angaben zu diesen Abhängigkeiten (Verdichtung, Feinkornanteil, Wassergehalt) veröffentlicht wurden.

Literatur

- [1] F.D. Börner, J.R. Schopper, A. Weller, „Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarisation measurements“, Geophysical Prospecting, Vol. 44, Seiten 583-601, 1996
- [2] 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
- [3] J. Schön, „Petrophysik“, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1983
- [4] J.B.T. Scott, R.D. Barker, „Characterization of sandstone by electrical spectroscopy for stratigraphical and hydrogeological investigations“, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 38, Seiten 143-154, Geological Society of London, 2005

Informationen zu den Autoren

Matthias Halisch – Diplomand

Kontaktdaten: Technische Universität Clausthal
Institut für Geophysik
Arnold-Sommerfeld Straße 1
38678 Clausthal-Zellerfeld
Telefon: 0 53 23 - 72 28 85
E-Mail: matthias.halisch@gmx.de

Arbeitsschwerpunkte/Themeninteressen:

- spektrale induzierte Polarisierung
- Petrophysik
- Archäometrie

beruflicher Werdegang:

- Studium der Geophysik an der TU Clausthal seit 2000
- Zur Zeit Diplomand am Institut für Geophysik

Andreas Weller – Diplom-Geophysiker, Professor, Dr. rer. nat. habil.

Kontaktdaten: Technische Universität Clausthal
Institut für Geophysik
Arnold-Sommerfeld Straße 1
38678 Clausthal-Zellerfeld
Telefon: 0 5323 - 722233
E-Mail: andreas.weller@tu-clausthal.de

Arbeitsschwerpunkte/Themeninteressen:

- Geoelektrik (Modellierung und Inversion)
- Petrophysik und Bohrlochgeophysik
- Ingenieurgeophysik und Archäometrie

beruflicher Werdegang:

- Studium der Geophysik, Promotion und Habilitation an der Bergakademie Freiberg
- 7 Jahre berufliche Tätigkeit bei VEB Geophysik/Geophysik GmbH in Leipzig
- Heisenbergstipendiat an der TU Braunschweig
- Professor für Petrophysik an der TU Clausthal seit 1999