

Spektrale induzierte Polarisierung in den Geowissenschaften und der Archäometrie

Andreas Weller

Institut für Geophysik, TU Clausthal

Stichworte: Spektrale induzierte Polarisierung, komplexe elektrische Leitfähigkeit, Geoelektrik, Archäometrie

I. EINLEITUNG

Die geoelektrischen Erkundungsmethoden nutzen die Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften von Gesteinen oder Materialien im Untergrund aus. Prinzipiell kann man davon ausgehen, dass dort, wo sich die Erkundungsobjekte (Erzkörper, archäologische Strukturen) nicht in ihren elektrischen Eigenschaften vom umgebenden Gestein signifikant unterscheiden, auch keine erfolgreiche Erkundung durchgeführt werden kann. Im Umkehrschluss gilt, dass bei besonders markanten Kontrasten in den elektrischen Eigenschaften auch die Chancen für einen geoelektrischen Nachweis am größten sind. Um die Erfolgsaussicht schon im Vorfeld abschätzen zu können, gewinnt die Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Gesteinen und Materialien mit Laborversuchen an Bedeutung. Dieser Aufgabenstellung widmet sich u.a. die Petrophysik, die das Bindeglied zwischen den Materialwissenschaften und der Erkundungsgeophysik darstellt.

Für geoelektrische Untersuchungen sind eine Vielzahl von Methoden entwickelt worden, die sich hinsichtlich der Anregung elektrischer oder elektromagnetischer Felder und dem nutzbaren Frequenzbereich unterscheiden. Als Quellen werden sowohl natürliche Felder (Eigenpotenzial oder elektromagnetische Variationen) als auch spezielle Geber genutzt, die galvanisch oder kapazitiv gekoppelt Strom in den Untergrund einspeisen oder als Spulen bzw. Antennen elektromagnetische Felder aussenden. Der Frequenzbereich reicht dabei von Gleichstromfeldern bei der klassischen Widerstandsgeoelektrik bis hin zu elektromagnetischen Feldern im Mega- bis Gigahertzbereich beim Georadar.

Dieser breite Frequenzbereich bei den unterschiedlichen Feldmessmethoden erfordert, die Frequenzabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften der Gesteine und Materialien zu untersuchen. Dabei werden im niederfrequenten Bereich die elektrische Leitfähigkeit und bei höheren Frequenzen bevorzugt die Dielektrizitätszahl betrachtet. Beide Größen sind

komplex und lassen sich durch Real- und Imaginärteil beschreiben.

Messungen über den gesamten Frequenzbereich können nicht durch ein einziges Messgerät abgedeckt werden. Am Institut für Geophysik der TU Clausthal sind drei Messplätze für die elektrischen Eigenschaften verfügbar. Für die komplexe Dielektrizitätszahl (Permittivität) steht ein Messsystem bestehend aus einem Netzwerkanalysator und einer kapazitiven Messzelle zur Verfügung, das in einem Frequenzbereich von 1 MHz bis 1,3 GHz betrieben wird. Für den Frequenzbereich von 9 kHz bis 100 MHz wird ein Vektoranalysator mit einer koaxialen Messzelle genutzt, wobei die Probe einen Teil des Innenleiters darstellt [1]. Für den niederfrequenten Bereich (1 mHz bis 12 kHz) wird eine Vierpunktmessanordnung gewählt. Die Strom- und Spannungsmessung erfolgt mit einem Messgerät vom Typ SIP Fuchs (Radic Research, Berlin).

Da wir mit unseren laufenden Forschungsarbeiten schwerpunktmäßig die Phänomene im Frequenzbereich unter 1 kHz untersuchen, konzentriert sich der Beitrag auf die entsprechende geophysikalische Methode der induzierten Polarisation (IP).

II. INDUZIERTE POLARISATION

Das Phänomen der induzierten Polarisation wurde schon von Conrad Schlumberger bei seinen ersten geoelektrischen Messungen mit Gleichstrom am Beginn des 20. Jahrhunderts festgestellt. Nachdem der Stromfluss zu den beiden einspeisenden Elektroden unterbrochen wurde, konnte ein langsames Abklingen des zwischen zwei Potentialelektroden gemessenen Spannungswertes beobachtet werden, das nicht allein durch die Trägheit der zu dieser Zeit verwendeten Galvanometer bedingt war. Der Boden zeigt eine Art kapazitives Verhalten, d.h. es erfolgt eine Aufladung oder Ladungstrennung bei geschlossenem Stromkreis. Nach dem Abschalten des Stromes kommt es zu einer Entladung, wobei die Ladungstrennung wieder aufgehoben wird.

Verschiedene Böden und Gesteine zeigen recht unterschiedliches Polarisationsverhalten. Besonders stark ausgeprägt sind die Polarisationseffekte bei Erzen oder auch bei metallischen Objekten im Untergrund. Diese Erscheinung entspricht der aus der Elektrochemie bekannten Elektrodenpolarisation, die auftritt, wenn ein Wechsel von elektronischer in elektrolytische Leitung stattfindet. Um den Ladungstransport über die Oberfläche eines Elektronenleiters zu gewährleisten, muss eine chemische Reaktion ablaufen, die den Ladungstransport verzögert und zur Ausbildung einer Überspannung (englisch: *Overvoltage*) führt. Diese Überspannung oder sekundäre Spannung wird beim

Abschalten des Stromflusses wieder abgebaut. Bei Messungen der induzierten Polarisation im Zeitbereich wird eine Folge von positiven und negativen Gleichstrompulsen in den Untergrund eingespeist, wobei zwischen den Pulsen der Strom für eine kurze Zeit abgeschaltet wird. In dieser Zeit erfolgt die Messung des zeitlichen Verlaufs des Abklingens der sekundären Spannung.

Wird mit einem sinusförmigen Wechselstrom gearbeitet, äußert sich die induzierte Polarisation sowohl in einer Frequenzabhängigkeit des gemessenen Widerstandes als auch in einer Phasenverschiebung zwischen dem Strom- und Spannungssignal. Ein Maß für die Stärke der Polarisation ist der Frequenzeffekt, der die relative Änderung des Widerstandes, der bei zwei unterschiedlichen Frequenzen gemessen wird, angibt. Auch die Größe der Phasenverschiebung erweist sich als ein geeigneter Indikator für die Stärke des Polarisationseffektes. Da der Widerstand und auch die Phasenverschiebung im Allgemeinen mit der Frequenz variieren, lässt sich eine vollständige Charakterisierung des elektrischen Verhaltens eines Materials (z.B. Boden, Gestein) durch die Darstellung des Spektrums von Amplitude und Phase des spezifischen elektrischen Widerstandes beschreiben. Die spektrale induzierte Polarisation (SIP) verfolgt das Ziel, in einem möglichst breiten Frequenzbereich das Spektrum des spezifischen elektrischen Widerstandes zu erfassen. Dabei sind insbesondere bei Feldmessungen zu höheren Frequenzen hin durch die einsetzenden elektromagnetischen Kopplungseffekte Grenzen gesetzt. Die Messung sehr kleiner Frequenzen wird durch die notwendigen langen Messzeiten begrenzt.

In Bild 1 wird das Ergebnis einer SIP-Labormessung an einer Bleierzprobe dargestellt. Das Spektrum wurde im Frequenzbereich von 1,4 mHz bis 750 Hz zweimal aufgenommen, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu beurteilen. Das Amplitudenspektrum (Bild 1a) zeigt eine kontinuierliche Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes mit zunehmender Frequenz. Besonders steil ist der Abfall im Bereich von 10 bis 100 Hz. Das Phasenspektrum (Bild 1b) weist zwischen 2 und 8 Hz ein deutliches Maximum von über 1000 Milliradian (mrad) oder 57° auf. Derartig hohe Phasenverschiebungen werden nur bei Reicherzen beobachtet, wobei sich die Amplitude des Maximums mit dem Metallgehalt korrelieren lässt. Die Lage des Phasenmaximums wird durch die Korngröße bestimmt [2]. Die bei vielen Erzen auftretende starke Elektrodenpolarisation ist auch der Grund dafür, dass IP-Messungen vor allem in der Erzerkundung erfolgreich eingesetzt werden.

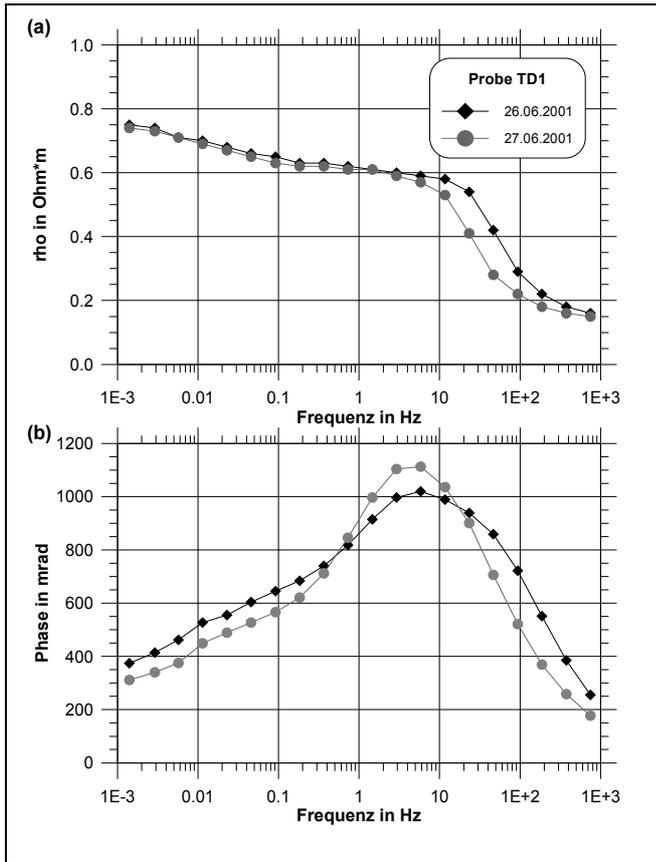


Bild 1: Elektrisches Spektrum einer Bleierzprobe im Frequenzbereich von 1,4 mHz bis 750 kHz. (a) Amplitude des spezifischen elektrischen Widerstandes. (b) Phasenspektrum.

Neben der Elektrodenpolarisation gibt es noch weitere Effekte, die eine Phasenverschiebung zwischen Strom- und Spannungssignal im Boden hervorrufen. Dazu gehören die Membranpolarisation und die Wirkung der elektrischen Doppelschicht, die sich an der Grenze zwischen dem Porenfluid und den festen Gesteinsbestandteilen ausbildet. Die Membranpolarisation entsteht durch die unterschiedliche Größe und Beweglichkeit der Ionen im konstriktiven Porenraum. Allerdings sind die dabei auftretenden Phasenverschiebungen ein bis zwei Größenordnungen kleiner als bei Erzen. Sie wurden in der Vergangenheit nur als Hintergrundeffekte wahrgenommen. Moderne IP-Messgeräte erlauben eine Genauigkeit bei der Bestimmung des Phasenwinkels von weniger als einem Milliradian. Damit wird es technisch möglich, schwächere Polarisationseffekte zuverlässig nachzuweisen und diese für neue Anwendungsgebiete nutzbar zu machen.

III. Modelle zur Beschreibung der induzierten Polarisation

Um neue Anwendungsgebiete zu erschließen, ist es zwingend erforderlich, die

auftretenden physikalischen Phänomene zu verstehen und durch geeignete Modelle zu beschreiben. Heute geht das Interesse an der induzierten Polarisation weit über die Erzerkundung hinaus. Doch auch im Zusammenhang mit den Erzen gibt es noch viele ungelöste Fragen. Die gemessenen Spektren können durch eine Vielzahl von mathematischen Modellen beschrieben werden. Die bekanntesten Modelle gehören zu der Cole-Cole-Familie [2]. Sie unterscheiden sich durch eine unterschiedliche Anzahl von Parametern. Der Zusammenhang zwischen den mathematischen Parametern und den Materialeigenschaften ist nur selten quantitativ zu beschreiben. Es gilt als gesichert, dass bei Erzen oder auch Schlacken die Korngröße der elektronisch leitenden Partikel mit der Relaxationszeit oder der Frequenz des Phasenmaximums korreliert. Bild 2 zeigt den Zusammenhang für Schlackenproben und ein künstliches Gemisch aus Chalkopyrit, Quarz und Zement [3].

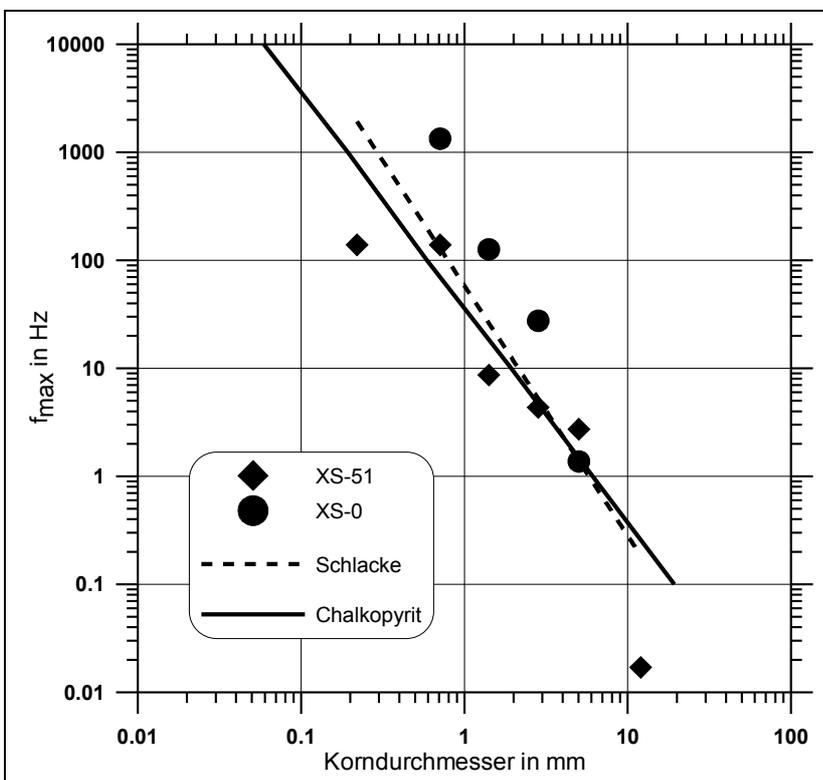


Bild 2: Zusammenhang zwischen Frequenz des Phasenmaximums und Korndurchmesser für Schlackestücke und Chalkopyritkörner.

Auch Sandsteine und andere Materialien zeigen teilweise Phasenspektren, die durch ein ausgeprägtes Maximum charakterisiert sind, d.h. ein sogenanntes Cole-Cole-Verhalten aufweisen. Die Lage dieses Phasenmaximums steht in Beziehung zum dominanten Porenhalsradius, wie Untersuchungen an ausgewählten Sandsteinproben gezeigt haben [4], [5]. Um den Zusammenhang zwischen den Polarisationsphänomenen und der

Porenraumstruktur auch quantitativ zu beschreiben, wurden verschiedenen Modelle entwickelt. Der besonderen Bedeutung der engen Porenkanäle trägt auch das Modell der „short narrow pores (SNP)“ Rechnung [6]. Dieses Modell wurde weiter entwickelt, indem ganze Netzwerke von unterschiedlichen Porenlängen und –radien in die Berechnung der elektrischen Eigenschaften einbezogen wurden [7]. Es werden aber auch Phasenspektren beobachtet, die über mehrere Frequenzdekaden einen nahezu konstanten Phasenwinkel aufweisen. Dieses Phänomen kann mit der fraktalen Geometrie des Porenraumes erklärt werden.

IV. NEUE ANWENDUNGEN DER INDUZIERTEN POLARISATION

Mit dem besseren Verständnis der auftretenden IP-Effekte erweitern sich auch die Anwendungsmöglichkeiten für dieses Verfahren. Dazu zählen erste Versuche, mit SIP-Messungen Kontaminationen zu identifizieren. Laboruntersuchungen hatten gezeigt, dass kontaminierte Porenfluide eine deutliche Änderung in der Phasenverschiebung hervorrufen können [8]-[10]. Die vielfältigen chemischen Reaktionen, die im Porenraum ablaufen, können jedoch nur schwer nachvollzogen werden. Auf diesem Gebiet besteht noch großer Forschungsbedarf.

Weitere Arbeiten verfolgen das Ziel, aus den Daten von SIP-Messungen die hydraulischen Parameter von Sedimenten zu bestimmen [11]-[13]. Die entwickelten Verfahren beruhen auf petrophysikalischen Modellen und auf empirischen Beziehungen und gelten daher nicht ohne Einschränkungen. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass die komplexen Leitfähigkeitsspektren nicht unerheblich von der chemischen Zusammensetzung des Wassers abhängen. Nicht nur die Konzentration der Lösung sondern auch die Ionenart wirkt sich aus [14].

Es gibt verschiedene Ansätze, das Verfahren zur Qualitätskontrolle von Baumaterialien einzusetzen [15]. Die Messungen an Lockermaterial reagieren sehr empfindlich auf Änderungen bei der Verdichtung, beim Feinkornanteil und Wassergehalt [16].

Mit der verbesserten IP-Messtechnik eröffnen sich auch neue Anwendungsmöglichkeiten für die Archäometrie. Verschiedene Materialien, die Gegenstand von archäologischen Untersuchungen sind, zeichnen sich durch markante Polarisierungseffekte aus. Dazu zählen die Schlacken von Hüttenprozessen. Bei der Verhüttung bleibt ein großer Anteil des Metallgehaltes in der Schlacke, die dadurch eine ähnlich hohe Elektrodenpolarisation aufweist wie die Erze. Über Schlackenfunde, deren Verteilung und Mengen können wichtige Aussagen zu den Hüttenplätzen abgeleitet werden [17], [18].

Die Untersuchung unterschiedlicher Holzarten in unserem Labor hat ergeben, dass die meisten rezenten sowie die von Fundstellen stammenden Hölzer deutliche Polarisierungseffekte aufweisen [19], [20]. Die Ursache für die auftretende Membranpolarisation liegt in der Zellenstruktur des Holzes begründet. Die Zellwände wirken als Membranen, die für verschiedene Ionen eine unterschiedliche Durchlässigkeit haben und daher eine Ladungstrennung bewirken. Italienische Wissenschaftler berichten über IP-Zeitbereichsmessungen in der Nähe von ausgegrabenen römischen Booten. Sie konnten eine erhöhte Aufladbarkeit (englisch: *chargeability*) nachweisen, die von den verschiedenen hölzernen Bootteilen hervorgerufen wird [21], [22]. Eigene Messungen über Bohlenwegen im Campemoor und im Federseemoor haben gezeigt, dass diese bis etwa einen Meter Tiefe über die Veränderungen in der Polarisierbarkeit nachgewiesen werden können [23], [24]. In diesem Zusammenhang wird auch die Fragestellung interessant, SIP-Messungen an lebenden Bäumen durchzuführen, um Hinweise auf Schädigungen des Holzes im Inneren des Baumstammes zu erhalten [25].

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Die Methode der spektralen induzierten Polarisation ist zur Zeit Gegenstand zahlreicher laufender Forschungsarbeiten. Dabei gewinnt die Charakterisierung von bestimmten Materialien durch ihre elektrischen Spektren an Bedeutung. Die Untersuchungen zeigen aber auch, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren das elektrische Verhalten der Materialien bestimmt. Es ist unbestritten, dass insbesondere Grenzflächeneffekte und die Geometrie des Porenraumes großen Einfluss auf die komplexe elektrische Leitfähigkeit haben. Es sind bisher weder alle Phänomene unzweifelhaft erklärbar, noch gibt es allgemeingültige physikalische und elektrochemische Modelle, mit denen alle Erscheinungen zuverlässig beschrieben werden können. Die Berücksichtigung der Erfahrungen von Wissenschaftlern anderer Fachgebiete, die sich mit der Impedanzspektroskopie für verschiedenen Anwendungen beschäftigen, kann wichtige Impulse für weitere Forschungsarbeiten zur elektrischen Spektroskopie in den Geowissenschaften und in der Archäometrie liefern.

LITERATUR

- [1] J. Schünemann, *Eignungsuntersuchung eines Netzwerkanalysators zur Widerstandsbestimmung von Gesteinen*, Diplomarbeit, TU Clausthal, 2002.

- [2] W.H. Pelton, S.H. Ward, P.G. Hallof, W.R. Sill, und P.H. Nelson, "Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP", *Geophysics* 43, 1978, S. 588-609.
- [3] Ch. Grisseemann, D. Rammlmair, C. Siegwart und N. Fouillet, „Spectral induced polarisation linked to image analyses: A new approach" in: Rammlmair et al. (eds.) *Applied Mineralogy*, S. 561- 564, Balkema, 2000.
- [4] J.B.T. Scott, R.D. Barker, „Determining pore-throat size in Permo-Triassic sandstones from low frequency electrical spectroscopy", *Geophysical Research Letters* Vol. 30, No. 9, 1450, 2003.
- [5] 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, S. 143-154, Geological Society of London, 2005.
- [6] K. Titov, V. Komarov, V. Tarasov und A. Levitski, „Theoretical and experimental study of time domain-induced polarization in water-saturated sands", *Journal of Applied Geophysics* 50, 2002, S. 417-433.
- [7] N. Klitzsch, *Ableitung von Gesteinseigenschaften aus Messungen der spektralen induzierten Polarisation (SIP) an Sedimentgesteinen*, Dissertation, Universität Leipzig, 2004.
- [8] G.R. Olhoeft, "Low frequency electrical properties", *Geophysics* 50, 1985, S. 2492-2530.
- [9] H. Vanhala, H. Soininen und I. Kukkonen, "Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment", *Geophysics* 57, 1992, S. 1014-1017.
- [10] F. Börner, M. Gruhne und J. Schön, J., "Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range", *Geophysical Prospecting* 41, 1993, S. 83-98.
- [11] F.D. Börner, J.R. Schopper und A. Weller, "Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements", *Geophysical Prospecting* 44, 1996, S. 583-601.
- [12] A. Weller und F.D. Börner, "Measurements of spectral induced polarization for environmental purposes", *Environmental Geology* 27, 1996, S. 329-334.
- [13] L.D. Slater und D. Lesmes D., "IP interpretation in environmental investigations", *Geophysics* 67, 2002, S. 77-88.
- [14] K. Breede und A. Weller, „SIP-Messungen mit unterschiedlichen Salzlösungen steigender Konzentration an Sandsteinen“, Beitrag zum 1. Symposium

Impedanzspektroskopie, 2006.

- [15] E. Niederleithinger und S. Kruschwitz, „SIP Messungen an Baumaterialien mit unterschiedlich salinen Porenwässern und Feuchtegehalten“, Beitrag zum 1. Symposium Impedanzspektroskopie, 2006.
- [16] M. Halisch und A. Weller, „Spektrale induzierte Polarisation an Lockermaterial: Einfluss von Einbaumethodik, Feinkornanteil und Wassergehalt auf die Messungen“, Beitrag zum 1. Symposium Impedanzspektroskopie, 2006.
- [17] A. Weller, S. Brune, T. Hennig und A. Kansy, A, "Spectral induced polarisation at a medieval smelting site", Proceedings of the 6th Meeting Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES), Bochum-Germany, 2000, EL 11.
- [18] A. Weller „Spektrale induzierte Polarisation in der Archäometrie“, Freiburger Forsch.-Hefte C496, 2003, S. 14-29.
- [19] B. Thierry, A. Weller, N. Schleifer und T. Westphal, "Polarisation effects of wood", Proceedings of the 7th Meeting Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES), Birmingham-England, 2001, S. 44-45.
- [20] S. Nordsiek und A. Weller, „Spektrale induzierte Polarisation (SIP) an Holz“, Beitrag zum 1. Symposium Impedanzspektroskopie, 2006.
- [21] G. Finzi-Contini, "Resistivity/IP tomographies near ancient boats embedded and preserved by fluvial sediments in an undiscovered ancient harbour, Pisa (Italy)", Proceedings of the 7th Meeting Environmental and Engineering Geophysics (EEGS-ES), Birmingham-England, 2001, S. 46-47.
- [22] G. Losito, A. Mazzetti und A. Trova, "Frequency electrical behaviour of soils and archaeological woods at laboratory and field scale in Roman boat area of Pisa-San Rossore (Italy)", Geophysical Research Abstracts, Vol. 3. European Geophysical Society (EGS) 26th Assembly in Nice, 2001, SE17.01.
- [23] A. Weller, A. Bauerochse und S. Nordsiek, „Einsatz der spektralen induzierten Polarisation bei der archäologischen Prospektion in Mooren“, Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 1, 2005, S. 17 – 20.
- [24] N. Schleifer, A. Weller, S. Schneider und A. Junge, "Investigation of a Bronze Age plankway by spectral induced polarization", Archaeological Prospection 9, 2002, 243-253.
- [25] T. Martin, „SIP an stehenden Bäumen“, Tagungsband zur 66. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 2006, S. 525f

Informationen zum Autor

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

Kontaktdaten: Technische Universität Clausthal
Institut für Geophysik
Arnold-Sommerfeld Straße 1
38678 Clausthal-Zellerfeld
Telefon: 05323 - 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