

Die Geophysik auf dem Holzweg

Untersuchungen an Hölzern mit der spektralen Induzierten Polarisation

Von Norbert Schleifer und Andreas Weller

Die spektrale Induzierte Polarisation (SIP) ist ein geoelektrisches Verfahren, das hauptsächlich zur Exploration von Erzen eingesetzt wird. Elektronische Leiter wie Metalloxide, Metallsulfide und Graphit produzieren starke Polarisationsseffekte und lassen sich durch die SIP hervorragend prospektieren. Daneben ist die Polarisierbarkeit eines Untergrundes auch von Tonmineralogie, Porenraum und chemischer Zusammensetzung der Porenlösung abhängig, weshalb das Verfahren seit den 80er Jahren verstärkt in der Umweltgeophysik zum Einsatz kommt. Zur Fragestellung gehören das Auffinden von Altlasten und der Grundwasserschutz.

Im Rahmen des DFG-Projekts „Elektrische Spektroskopie“ wird am Institut für Geophysik der TU Clausthal erforscht, welche archäologischen Materialien polarisierbar sind.

Ziel ist es, die Methode in der archäologischen Prospektion zu etablieren.

Die lange Tradition der Erzverhüttung in der Harzregion und die Erfahrungen aus der Erzprospektion führten dazu, dass sich die petrophysikalische Untersuchung von Schlacken zu einem Schwerpunkt des Projekts entwickelte. Mit Hilfe der Montanarchäologen des Landes-

amtes für Denkmalpflege, Außenstelle Goslar, konnten die Laboregebnisse schließlich im Feld umgesetzt und zum Auffinden von Schlackegruben und Verhüttungsöfen genutzt werden.

Ein zweiter Schwerpunkt des Projekts ist die Bestimmung der Spektren archäologischer Hölzer. Holz spielt durch die dendrochronologische Datierung von Fundstellen eine wichtige Rolle. Bislang konnten aber mit keiner geophysikalischen Methode Holzobjekte zufriedenstellend prospektiert werden. Die Bergung gut erhaltener Holzfunde gelingt meist nur in Feuchtböden. Die hohe elektrische Leitfähigkeit dieser Böden, die sich kaum von der wassergesättigten Hölzer unterscheidet, begrenzt die Untersuchungstiefe elektromagnetischer Verfahren. Erste erfolgreiche Labormessungen mit SIP wurden an rezenten Hölzern durchgeführt. Außerdem wurden Holzproben aus Fachwerkhäusern des Spessarts und der Marktkirche zum Heiligen Geist in Clausthal in die Untersuchungen einbezogen. An Hölzern aus dem Federseemoor bei Bad Buchau (Ldkr. Biberach) und dem Campemoor (Ldkr. Vechta) sollte schließlich überprüft werden, ob auch archäologische Hölzer, die über mehrere tausend Jahre im Boden konserviert wurden, polarisierbar sind.

Die Methode

Die Induzierte Polarisation (IP) zählt zu den geoelektrischen Methoden der angewandten Geophysik. Über zwei Stromelektroden wird eine definierte Signalform, meist ein Sinus- oder Rechtecksignal, von wenigen Milliampere in den Untergrund eingespeist. Zwischen zwei weiteren Elektroden wird das elektrische Potential bestimmt. Die Messung der IP mit mehr als einer Frequenz bezeichnet man als spektrale Induzierte Polarisation. Die Frequenzen mit denen SIP-Messungen durchgeführt werden, reichen von wenigen Millihertz bis zu einigen Kilohertz.

Polarisationseffekte im Untergrund führen zu einer Phasenverschiebung zwischen Stromsignal und gemessener Spannung. Die Messeinheit ist Milliradian (mrad). Die Ursachen für Polarisationsseffekte sind elektrochemische Vorgänge an den Grenzflächen zwischen Mineralien und dem Elektrolyt im Porenraum. Wird ein äußeres elektrisches Feld erzeugt, versuchen die Ionen innerhalb des Elektrolyts ein Ladungsgleichgewicht im Untergrund herzustellen. Erz- und Tonminerale sowie Engstellen im Porenraum (Membraneffekt) und die chemische Zusammensetzung des Elektrolyts beeinflussen diesen Ladungsausgleich und können zu einer zeitlichen Verschiebung bzw. Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung führen.

Das Auftreten von Polarisationsseffekten wurde erstmals bei der Durchführung von Widerstandsmessungen in den 30er Jahren beobachtet und anschließend gezielt zur Erkundung von Erzlagern verwendet.

Laboraufbau und Präparation der Proben

Die Labormessungen werden mit einer SIP-Fuchs-Apparatur durchgeführt. Die Apparatur zeichnet das Stromsignal und das gemessene Potential auf. Nach Abschluss jeder Frequenzmessung werden die Daten an die Basiseinheit weitergeleitet, wo der spezifische Widerstand und die Phase berechnet werden. Mit Hilfe eines Laptops lassen sich die Frequenzspektren der beiden Parameter während einer laufenden Messung in Echtzeit darstellen. Die SIP-Fuchs arbeitet in einem Frequenzbereich von 1,4 mHz bis zu 12 kHz. Die Aufzeichnung eines kompletten Spektrums dauert etwa zwei Stunden. ▶

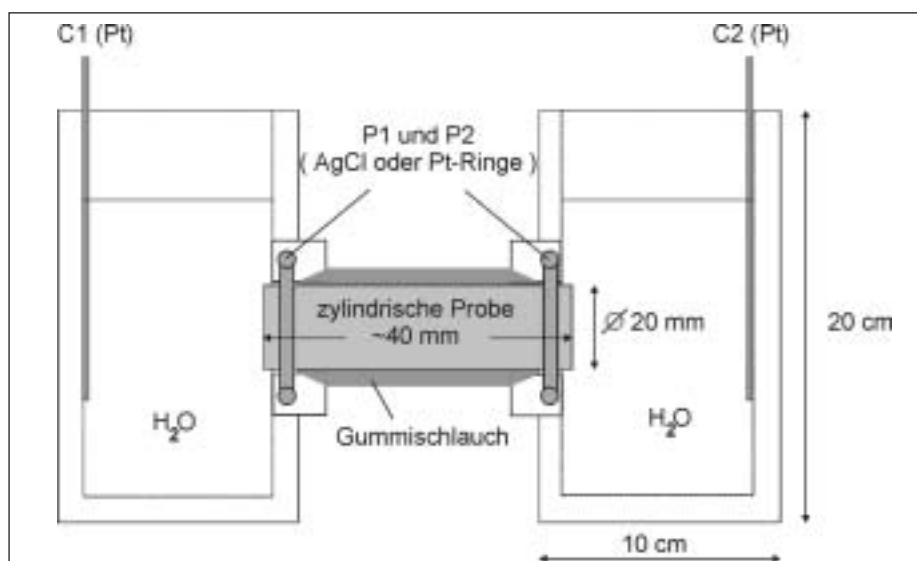


Bild 1: Skizze des Laboraufbaus. Die Elektroden aus Platin (Pt) sind mit P1 und P2 (Potentialmessung) und C1 und C2 (Stromeinspeisung) gekennzeichnet.



Bild 2: Scheibe des Eichenbalkens aus der Marktkirche zum Heiligen Geist. Die Entnahmepunkte der axialen Proben sind deutlich zu erkennen.

Der Aufbau besteht aus zwei Wassertanks (Bild 1), die mit Leitungswasser gefüllt sind. Zwei konische Probenhalter justieren die Probe zwischen den Tanks (Bild 1). In jeden Probenhalter ist eine ringförmige Potentialelektrode integriert, die optional aus Platin oder Silberchloriddraht bestehen kann. Platinelektroden, die sich in den Wassertanks befinden, speisen das Stromsignal ein. Der Stromfluss wird dabei über das Leitungswasser gewährleistet.

Die zylindrische Holzprobe mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Länge von etwa 35 mm wird zwischen den beiden Wassertanks eingespannt und mit Hilfe eines Gummischlauchs abdichtet. Um Anisotropie-Effekte zu berücksichtigen, wird versucht, aus Handstücken zylindrische Proben parallel und senkrecht zu den Jahrringen zu entnehmen. In Analogie zu Bohrkernen bezeichnet man erstere als axiale und letztere als radiale Probe. Vor der Messung werden die Holzproben mit Leitungswasser gesättigt. Die Handstücke aus den Mooren waren bereits wassergesättigt und wurden in diesem Zustand auch gemessen.

Ergebnisse

Spektren von Holzproben der Marktkirche zum Heiligen Geist

Während Sanierungsarbeiten an der Marktkirche zum Heiligen Geist im Stadtteil Clausthal wurde dem Institut für Geophysik ein Stück eines Eichenbalkens aus dem Mittelbau für Laboruntersuchungen zur Verfügung gestellt. Eine Datierung des Balkens im dendrochronologischen Labor des Seminars für Vor- und Frühgeschichte der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main ergab als Fälldatum der Eiche das Jahr 1723 n. Chr. (Labor-Nr. Ffm 2444).

Den Jahrringen von außen nach innen folgend wurden dem Balken 11 zylindrische Proben in axialer Richtung entnommen (Bild 2). Es sollte untersucht werden, ob die Lage des Entnahme-

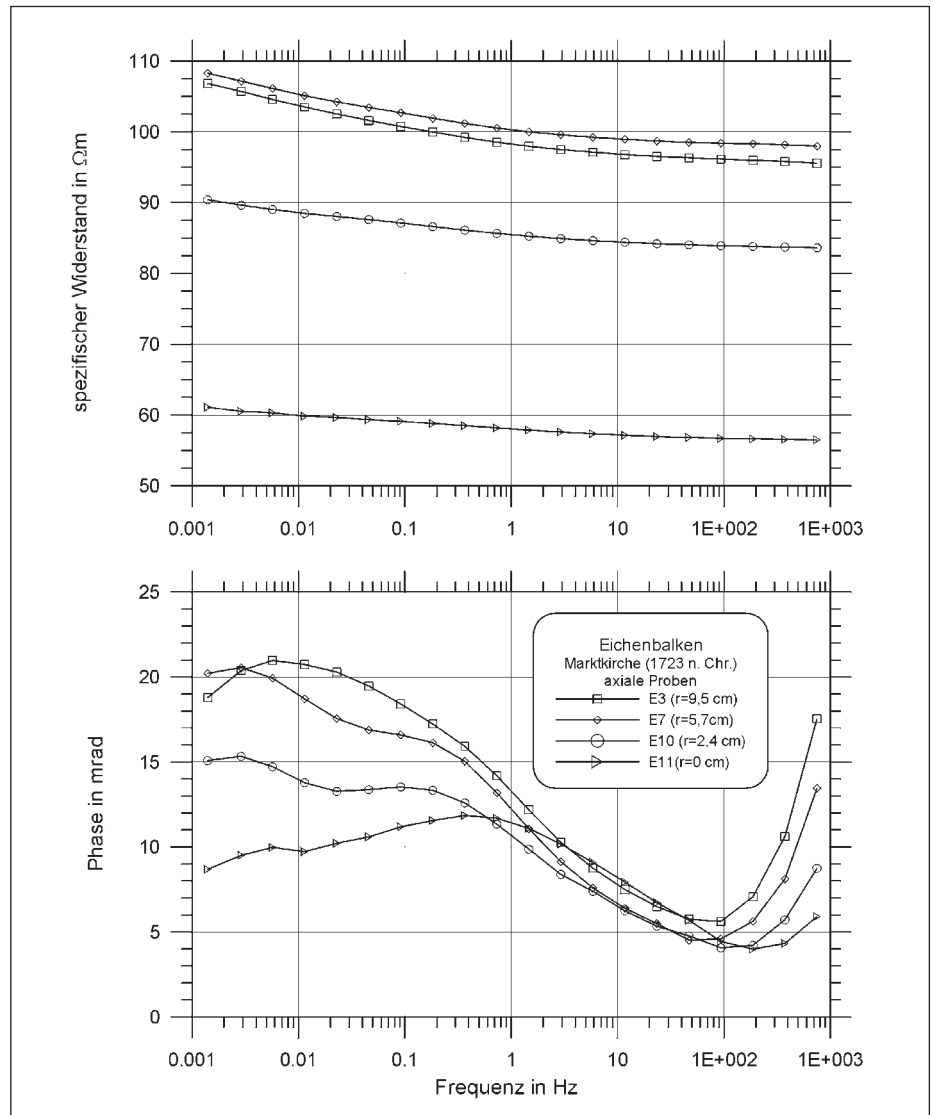


Bild 3: Spektren von vier ausgewählten Proben des Eichenbalkens aus der Marktkirche zum Heiligen Geist

punktes der Probe einen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Bild 3 zeigt die Spektren von vier ausgewählten Proben. Die spezifischen Widerstände der einzelnen Proben reichen von 60 bis 110 Ωm .

Der generelle Verlauf der Phasenspektren folgt einem Muster. Einem Phasenmaximum im Frequenzbereich 1 mHz bis 1 Hz folgt ein Minimum zwischen 10 Hz und 1 kHz. Zwischen 1 und 100 Hz lassen sich die Phasenspektren der Holzproben kaum unterscheiden. Mit zunehmendem Abstand der Proben von der Baummitte nehmen die niederfrequenten Phasen zu. Es deutet sich eine Abhängigkeit der Messparameter zum Abstand von der Baummitte an. Tatsächlich ergibt sich eine Korrelation der Phasen zwischen 0,01 und 0,1 Hz und den Radien der Entnahmepunkte aller elf Proben. Die Phasen zeigen einen stetigen und fast linearen Anstieg mit zunehmendem Abstand. Liegen die Phasenwerte der innersten Probe noch bei 10 mrad, erreichen die Proben am äußeren Rand über

24 mrad. Eine Erklärung für diese Korrelation ist die abnehmende Breite der Jahrringe mit zunehmendem Radialabstand. Eine feinere Faser- und Porenstruktur zu vielen Engstellen, die für das Auftreten von Membranefekten verantwortlich sind. Die Folge sind erhöhte Phasenwerte.

Vergleich rezenter und archäologischer Hölzer

Ein Vergleich von Proben gleicher Holzart, aber unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Herkunft war ein zweiter Schwerpunkt unserer Untersuchungen.

Zum einen standen uns zahlreiche Holzproben aus Fachwerkhäusern des Spessarts zur Verfügung, zum anderen wurden von den Landesämtern für Denkmalpflege der Bundesländer Niedersachsen und Baden-Württemberg archäologische Hölzer bereitgestellt, die über Tausende von Jahren in Moorböden konserviert worden waren. ►

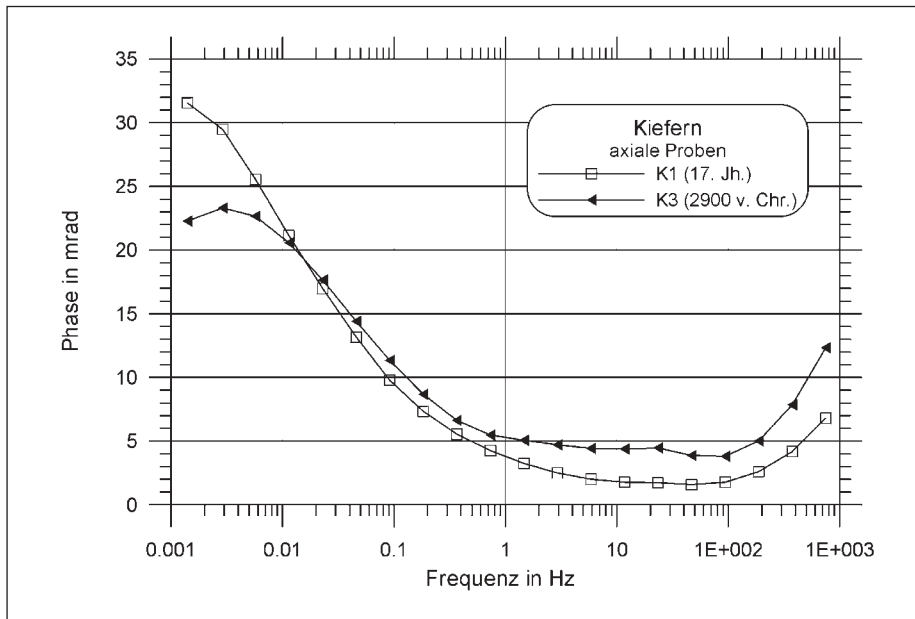


Bild 4: Vergleich zweier axialer Kiefernproben unterschiedlichen Alters

Bild 4 zeigt den Vergleich von zwei Kiefernproben, die in axialer Richtung entnommen wurden. Bei K1 handelt es sich um eine Probe aus dem hessischen Heppenheim datiert in das 17. Jh., bei K3 um eine Probe einer jungneolithischen Holzbohle (2900 v. Chr.), geborgen aus dem Campemoor bei Vechta.

Die Widerstandsspektren der Proben variieren zwischen 50 und 300 Ωm .

Die rezente Probe K1 besitzt Widerstände von 260 bis 280 Ωm , die Probe K3 aus dem Campemoor Werte zwischen 210 und 230 Ωm . Bei beiden Proben zeigt sich eine geringe Frequenzabhängigkeit der Widerstände. Die Phasenspektren (Bild 4) zeigen den gleichen charakteristischen Verlauf mit einem Minimum im Frequenzbereich zwischen 1 und 100 Hz. Dabei bleiben die Phasenwinkel unterhalb 10 mrad. Höhere Werte werden nur unterhalb 0,1 Hz bzw. oberhalb 100 Hz erreicht. Auffällig ist, dass die Phasen von K1 fast über das gesamte Spektrum unter den Werten von K3 bleiben. Erst bei etwa 10 mHz schneiden sich die Phasenkurven, und K1 erreicht Werte von über 30 mrad, während das Maximum von K3 bei 23 mrad liegt.

Untersuchungen zur Anisotropie

Die Untersuchung der Anisotropie der komplexen elektrischen Leitfähigkeit wird mit Hilfe von radial und axial entnommenen Proben durchgeführt. **Bild 5** zeigt die Spektren einer Eschenprobe, die von einem bronzezeitlichen (1500-1400 v. Chr.) Bohlenweg im Federseemoor stammt. Die Widerstandsspektren liegen zwischen 40 und 80 Ωm . Unterhalb 10 Hz lassen sich die Spektren der axialen und radialen Probe deutlich unterscheiden. Die radiale Probe besitzt Werte um 70 Ωm , die axiale Probe 50 bis 60 Ωm .

Beide Proben besitzen ein Phasenmaximum bei etwa 10 Hz, unterscheiden sich aber in der Amplitude. Das Maximum der radialen Probe erreicht mit 70 mrad einen etwa um das Vierfache höheren Wert als das Maximum der axialen Probe. Außer diesem Maximum erreichen die Phasen der axialen Eschenprobe nur Werte unterhalb 10 mrad. Nur unterhalb 0,01 Hz sinken die Werte der radialen Probe unter 10 mrad.

Feldmessung

Motiviert durch die Laboruntersuchungen, folgte im August 2001 eine Feldmessung im Federseemoor. Das Federseemoor, etwa 50 km nördlich des Bodensees und etwa 10 km östlich der Donau, gilt als eines der bedeutendsten Fundgebiete für die Pfahlbauforschung. Die Pfahlbausiedlungen rund um den Federsee gelten als einzigartige Fundlandschaft Südwestdeutschlands. Siedlungsspuren fanden sich von der Mittelsteinzeit (ca. 5000 v. Chr.) bis in die Hallstattzeit (ca. 600 v. Chr.). Untersuchungsobjekt war der bronzezeitliche Bohlenweg, dem bereits Holzproben für Labormessungen entnommen wurden (Bild 5). ▶

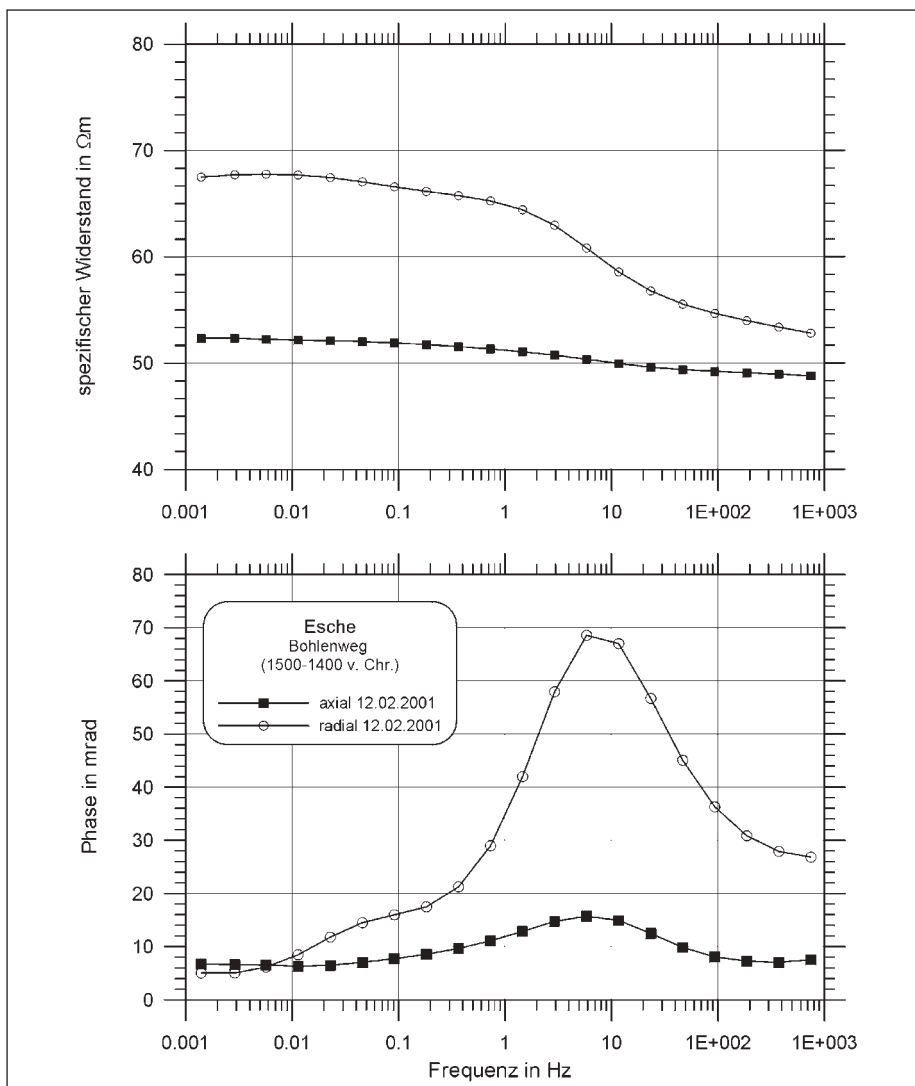


Bild 5: Spektren einer bronzezeitlichen Esche

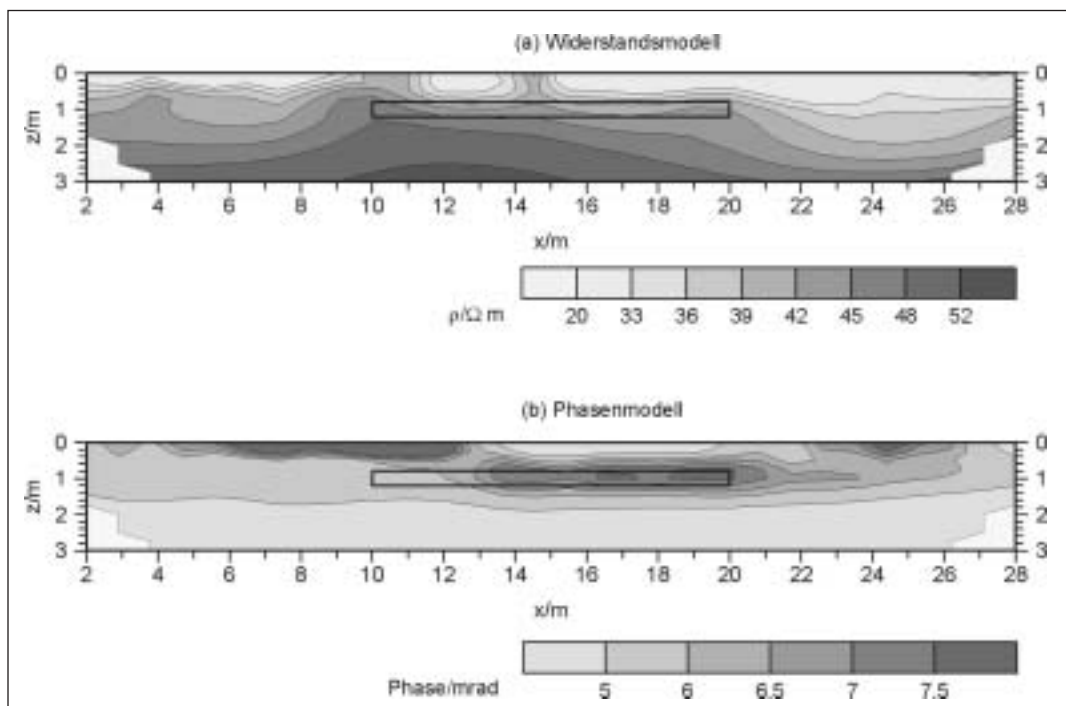


Bild 6: Ergebnis einer Profilmessung senkrecht zum Bohlenweg. Die vermutete Lage des Weges ist als Rechteck angedeutet.

Mit Hilfe dendrochronologischer Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass der Bohlenweg in Abständen von etwa 50 Jahren zweimal erweitert wurde, bis er eine Breite von etwa 9 m besaß. Der südlichste und älteste Abschnitt des Bohlenwegs besteht hauptsächlich aus Erlenholz und wurde stellenweise mit Buchenholz ausgebessert. Insgesamt setzt sich der Bohlenweg aus vier verschiedenen Holzarten zusammen: Buche, Erle, Esche und Birke. Der Bohlenweg ist heute von einer etwa 90 cm dicken Torfschicht bedeckt. An gut erhaltenen Stellen hat er eine Dicke von etwa 30 cm.

Basierend auf den Laborergebnissen (Bild 5) wurden 10 Frequenzen zwischen 1 und 60 Hz aufgezeichnet. Das Messprofil verlief senkrecht zur Laufrichtung des Bohlenwegs und hatte eine Länge von 30 m. Die Messelektroden waren im Abstand von 1 m angeordnet. Als Messapparatur wurde eine SIP-256 verwendet, die vom Institut für Meteorologie und Geophysik der J.W. Goethe-Universität in Frankfurt/M. zur Verfügung gestellt wurde.

Bild 6 zeigt das resultierende Untergrundmodell der 5 Hz-Messung. Die vermutete Lage des Bohlenwegs ist als Rechteck angedeutet. Neben einer Zunahme der Widerstände mit der Tiefe ist ein Plateau zu erkennen, das mit der Lage des Bohlenwegs korreliert. Das Plateau ist ein indirekter Hinweis auf die verborgene archäologische Struktur. Im Gegensatz zum Widerstand ist der Bohlenweg im Phasenmodell deutlich zu erkennen. Die Anomalie mit Phasen von 7 bis 9 mrad liegt fast exakt im Bereich des Rechtecks und stimmt mit der vorhergesagten Position des Weges überein. Während die rechten, d.h. nördlichen beiden Bahnen zu sehen sind, fehlt die

älteste Bahn des Bohlenwegs im Phasenmodell. Vermutlich ist der schlechte Erhaltungszustand der ältesten Fahrbahn für das Verschwinden im Phasenmodell verantwortlich.

Das vorliegende Ergebnis bestätigt die Laborergebnisse. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass sich die spektrale Induzierte Polarisation zur Prospektion von Holzobjekten eignet. Während der Bohlenweg in der Widerstandsmessung nur indirekt erfasst wird, stimmen Lage und Ausdehnung des Objekts im Phasenmodell mit den Angaben der Archäologen überein.

Zusammenfassung

Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass die Spektren des komplexen Widerstands je nach Alter und Art des Holzes stark variieren können. Am Beispiel des Eichenbalkens aus der Marktkirche konnte nachgewiesen werden, dass sich die Phasenwerte der 92- und 46 mHz-Messung mit dem radialen Abstand von der Baummitte korrelieren lassen, während dies mit den spezifischen Widerständen nicht gelang. Eine Erklärung für diese Korrelation ist die abnehmende Breite der Jahrringe mit zunehmendem Radialabstand.

Archäologische und rezente Proben der gleichen Holzarten besitzen trotz Fälldaten, die mehr als 3000 Jahre auseinanderliegen, einen ähnlichen charakteristischen Verlauf der Phasenspektren. Neben der Kiefer besitzen auch Buche, Eiche und Weide vergleichbare Spektren. Andererseits kann bei unseren Untersuchungen im Labor auch beobachtet werden, dass Spektren signifikant voneinander abweichen, obwohl die Proben aus dem gleichen Holzstück entnom-

men wurden. Grundsätzlich besitzen Hölzer aus Moorböden geringere Widerstandswerte als wassergesättigte rezente Proben.

Eine ausgeprägte Anisotropie in den Phasen- und Widerstandsspektren konnte nachgewiesen werden. Es lassen sich axiale und radiale Proben aufgrund ihrer Spektren unterscheiden. Die Widerstände der axialen liegen dabei in der Regel unterhalb der Werte der radialen Probe. Diese ausgeprägte Anisotropie der Hölzer lässt sich vermutlich mit der Versorgung der Bäume über die Wurzeln erklären. Diese Versorgung verläuft in axialer Richtung, was eine höhere Durchlässigkeit und damit auch elektrische Leitfähigkeit in dieser Richtung bedingt. Die Labormessungen bildeten die Grundlage für die erste Anwendung der Methode zum Auffinden von Holzobjekten. Entscheidend für den Erfolg der Feldmessung war, dass

die Messfrequenzen mit den größten Phaseneffekten durch die Voruntersuchungen im Labor bekannt waren.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine grundlegende Erkenntnis unserer Untersuchungen ist, dass Holz polarisierbar ist und zwar unabhängig von Art und Alter. Die spektrale Induzierte Polarisation bietet sich damit als Methode zum Auffinden von Holzobjekten an. Tatsächlich gelang es, einen bronzezeitlichen Bohlenweg mit Hilfe der SIP zu prospektieren. Dies ist ein weiterer Schritt auf dem Weg, die SIP in der archäologischen Prospektion zu etablieren. Noch ist die Anzahl von bislang 51 untersuchten Holzproben gering, jedoch zeigt sich bereits jetzt, dass jede Holzart ein charakteristisches Phasenspektrum besitzt. Ein weiteres interessantes Ergebnis ist die Korrelation der Phasenwerte mit dem Abstand von der Baummitte. Dieses Ergebnis muss jedoch durch Messungen an weiteren Baumscheiben bestätigt werden. Für das grundlegende Verständnis der auftretenden Effekte und für die Erschließung weiterer Anwendungsmöglichkeiten der Methode wird die Zusammenarbeit mit Holzfachleuten und Botanikern angestrebt.

Dipl.-Geophys. Norbert Schleifer
Institut für Geophysik
Arnold-Sommerfeld-Straße 1
38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: 05323/72-2734
Fax: 05323/72-2320
E-Mail: norbert.schleifer@tu-clausthal.de
<http://www.ifg.tu-clausthal.de>