# Messung der TEM-Antwort von Bodenproben

J. Neumann, R. Bergers, S. L. Helwig, T. Hanstein, N. Kozhevnikov, B. Tezkan

## **Einleitung**

TEM-Messungen auf einer ehemaligen Bauschuttdeponie in Köln, die auch als "wilde Deponie"missbraucht wurde, führten zur Hypothese, dass magnetisch viskoses Material die gemessenen TEM-Transienten verursachen (*Gaidetzka et al.* (2001)). Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden im Labor die TEM-Antworten von Bohrkernproben der Altlast gemessen und mit TEM-Antworten von selbstpreparierten Kontrollproben verglichen. Die Kontrollproben bestehen aus superparamagnetischem Boden und getrockneten Quarzsand mit Kugellagerkugeln.

#### Motivation: TEM Transienten der Altlast

Auf der rekultivierten Altlast wurden IP, Geoelektrik, Magnetik sowie RMT-Messungen durchgeführt (Recher (2002)). TEM-Messungen wurden zunächst in central-loop Konfiguration im Zeitbereich von 4  $\mu$ s bis 1 ms durchgeführt (Gaidetzka et al. (2001)). Die bei diesen Messungen gewonnenen Daten zeigen im Zeitbereich von 0,1 bis 1 ms eine Steigung von ca. -1,25. Dies kann charakteristisch für superparamagnetisches Material sein (Barsukov und Fainberg (2001)), andererseits ist superparamagnetisches Material nicht für eine Altlast zu erwarten. Zur genaueren Untersuchung wurden weitere TEM-Messungen in central-loop und separate-loop Konfiguration und größerem Zeitbereich durchgeführt (vgl. Abb. 1). Bei den in central-loop Konfiguration gemessenen Transienten nähert sich die Steigung im Spätzeitbereich dem zu erwartetem Wert von -2,5 an (vgl. Abb. 1(a)). Dafür zeigen die Transienten in separate-loop Messkonfiguration einen doppelten Vorzeichenwechsel (vgl. Abb. 1(b)).

Die in separate-loop Konfiguration gemessenen Transienten können nicht durch ein 1-D Modell ohne magnetisch viskose Schichten erklärt werden. Auch ein IP-Effekt kann die Daten nicht erklären, da dies auch einen Vorzeichenwechsel in den mit central-loop Konfiguration gemessenen Transienten verursachen würde (vgl. Fils et al. (1989)).

Ein doppelter Vorzeichenwechsel in den Transienten kann durch einen Untergrund mit sehr leitfähigen, räumlich begrenzten Objekten oder durch eine Schicht mit magnetisch viskosem Material erklärt werden.

#### Theorie

Die hier dargestellten Zusammenhänge findet man im wesentlichen bei Lowrie (1997) und Chikazumi (1966).

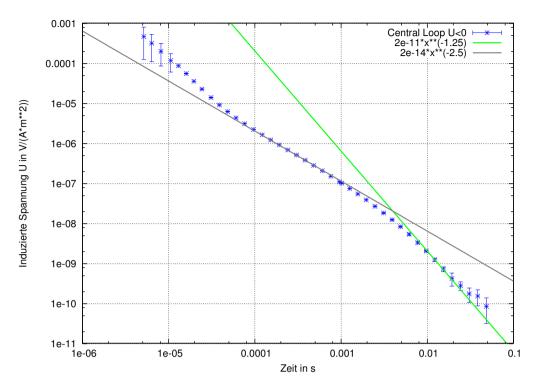
Bei TEM wird die Ausbreitung des Stroms im Untergrund durch die Diffusionsgleichung und das Ohmsche Gesetz beschrieben:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \; ; \; j = \sigma \vec{E}$$
 (1)

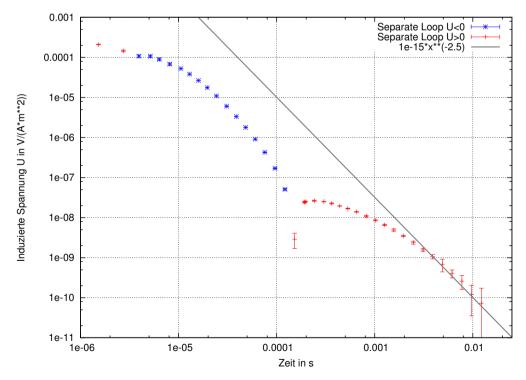
Gemessen wird die Änderung des magnetischen Flusses durch eine Empfangsspule, der durch abklingende Stromsysteme im Untergrund erzeugt wird. Dies gilt nicht mehr bei magnetisch viskosen Material.

Magnetische Viskosität bezeichnet die Eigenschaft, dass die Magnetisierung verzögert auf die Änderung des Magnetfeldes reagiert. Superparamagnetismus bezeichnet einen Mechanismus für magnetisch viskoses Verhalten.

Superparamagnetismus ist bei remanent magnetisierbaren und insbesondere bei ferrimagnetischen Mineralien mit sehr kleinen Korngrößen beobachtbar. Dies liegt an der Abhängigkeit der Koerzitivität von der Form und der Größe der Körner. Die Koerzitivität bezeichnet die Stabilität der Magnetisierung von remanent magnetisierten Materialien. Die Koerzitivität eines Korn mit einheitlicher Ordnung der atomaren magnetischen



(a) Bei den in central-loop Konfiguration gemessenen Transienten beträgt die Steigung im Zeitbereich zwischen 0,1 und 1 ms nur -1,25. Erst zu noch späteren Zeiten wird ein noch stärkeres Abklingen des Signals beobachtet.



(b) Bei den in separate-loop Konfiguration gemessenen Transienten tritt neben dem typischen Vorzeichenwechsel zu frühen Zeiten ein ungewöhnlicher Vorzeichenwechsel bei ca. 0,1 ms auf.

Abbildung 1: typische Verläufe der über der Altlast gemessenen Transienten in a: central-loop und b: separateloop Konfiguration.

Dipole nimmt mit der Größe des Korns zu. Bei Superparamagnetismus ist die Magnetisierung eines Kornes ohne ein äußeres Magnetfeld nicht mehr stabil. Die Korngröße und damit die Koerizitivität ist so klein, dass die zur Änderung der Richtung der Magnetisierung notwendige Änderung der inneren Energie durch thermische Fluktuationen möglich ist.

Dieser Prozess der Änderung der Magnetisierung ist für ein Korn spontan und kann für viele Körner einer Korngröße durch ein exponentielles Gesetz mit einer Zerfallskonstanten  $\tau$  geschrieben werden:

$$au \propto e^{-rac{VK_u}{kT}}$$
 . (2)

Dabei ist  $K_u$  die einachsige magnetokristalline Anisotropiekonstante, V das Volumen, T die Temperatur und k die Bolzmannkonstante.

Bei natürlich gebildetem superparamagnetischem Boden kann man von einer Verteilung verschiedener Korngrößen ausgehen. Die zeitabhängige Magnetisierung wird durch Superposition von gewichteten  $e^{-t/\tau}$  Termen beschrieben. Wird diese Wichtung  $1/\tau$  gesetzt, führt dies zu

$$\vec{M}(t) = \frac{\vec{M}_0}{N} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} d\tau \tag{3}$$

$$\Rightarrow \vec{M}(t) \approx \vec{M}_0 \frac{1}{\ln(\tau_2/\tau_1)} (\ln(\tau_2) - 0.577 - \ln(t)) \text{ für } \tau_1 < t < \tau_2 . \tag{4}$$

Hierbei ist  $\tau_1$  die kleinste und  $\tau_2$  die größte Zerfallskonstante, welche mit der kleinsten und der größten Korngröße korrespondiert und  $\vec{M}_0$  die Magnetisierung direkt nach Abschalten des äußeren Magnetfeldes. N ist einer Normierungskonstante, für die  $N = \int_{\tau_2}^{\tau_2} 1/\tau \, d\tau = \ln(\tau_2/\tau_1)$  gelten muss, da das Integral in Gl. 3 für den Zeitpunkt t=0 die Magnetisierung  $\vec{M}_0$  liefern muss. Eine ausführliche Herleitung von Gl. 4 findet man bei Chikazumi (1966).

Für die im Empfängerkabel induzierten Spannung gilt dann:

$$U_{\rm ind} \propto \int \frac{\partial \vec{M}(t)}{\partial t} dV \propto -\frac{1}{t} \,.$$
 (5)

## Messung der TEM-Antwort in Labor

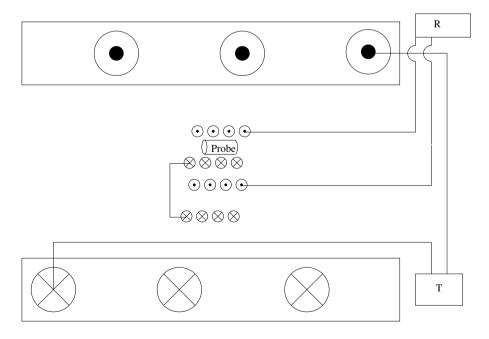


Abbildung 2: Spulenanordnung zur Messung der TEM-Antwort einer Probe

Das Ziel des Baus der Laborapparatur war es, magnetisch viskoses Material in Bohrlochproben der Altlast nachzuweisen (vgl. Buselli (1982)). Das Messsystem besteht aus einer großen Sendespule und zwei differentiell

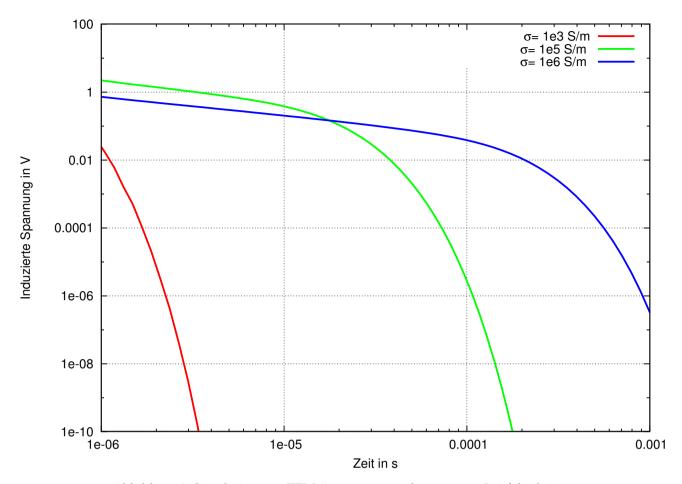


Abbildung 3: Simulation von TEM-Antworten mit homogenen Leitfähigkeiten

geschalteten Empfangsspulen und ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Die Induktion des Primärfelds in den beiden Empfangsspulen hebt sich gegenseitig auf und verhindert die Übersteuerung der Empfangselektronik. zur Datenaufzeichnung wurde die Kölner NanoTEM-Ausrüstung verwendet, was in Abb. 2 mit T (Sender) und R (Empfänger) angedeutet ist. Die Proben sind zylinderförmig, 60 mm hoch und 20 mm im Radius.

## Simulation der Messapparatur

Die Messung von Proben ohne magnetische Viskosität wurde mit dem Programm FEMLAB simuliert. Dies wurde genutzt, um die Messapparatur mit einem genau abgemessen Aluminium-Zylinder auf systematische Fehler zu überprüfen. Der relative Fehler zwischen simulierten und gemessenen Transienten liegt bei ca. 25%. Mit den Simulationen kann daher nur die Größenordnung der gemessenen Signale bestimmt werden. Dies ist ausreichend zur Abschätzung der minimalen Leitfähigkeit, die eine Probe haben muss, um ein messbares Signal zu erzeugen. Für drei Proben mit den homogenen Leitfähigkeiten  $\sigma=10^3~S/m$ ,  $\sigma=10^5~S/m$  und  $\sigma=10^6~S/m$  ist dies in Abb. 3 abgebildet. Die Messelektronik kann Spannungen oberhalb von  $10^{-5}~s$  auflösen. Da für natürliche Bodenproben Leitfähigkeiten in der Größenordnung von  $\sigma=10^3~S/m$  und größer unrealistisch sind, kann man davon ausgehen, dass die homogene Leitfähigkeit einer Bodenprobe kein messbares Signal erzeugt. Dies wurde mit einer Probe, welche eine gesättigte Salzwasserlösung enthielt, überprüft.

### TEM-Antwort der Kontrollproben

Die TEM-Antworten der Bohrkernproben wurden mit TEM-Antworten der Kontrollproben verglichen. Die Kontrollproben teilen sich auf in Proben mit superparamagnetischem Boden (Laterit) und Proben, die eine oder mehrere Stahlkugeln enthalten. Die Stahlkugeln werden in diesen Proben mit trockenem Quarzsand in ihrer Position fixiert.

Die im Labor gemessenen TEM-Antworten einiger Kontrollproben sind in Abb. 4 zu sehen. Die Transienten der Kontrollproben mit den Stahlkugeln zeigen ein exponentielles Abklingverhalten und unterschieden sich damit von dem Abklingverhalten des superparamagnetischen Bodenes. Im Einklang zu Gl. 4 induzieren die

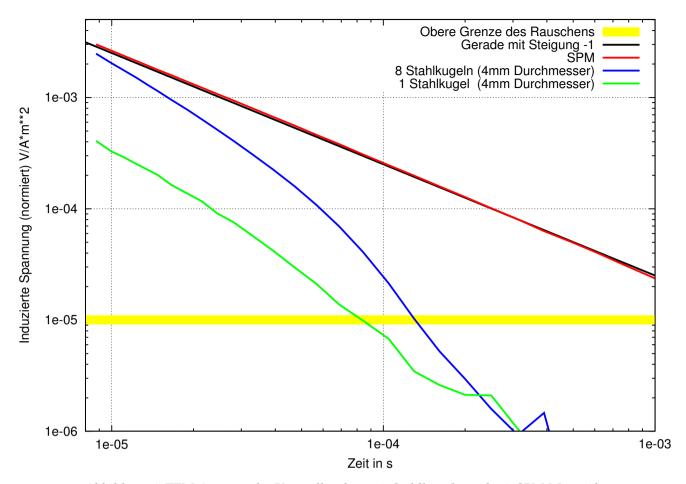


Abbildung 4: TEM-Antwort der Kontrollproben mit Stahlkugeln und mit SPM-Material

superparamagnetischen Proben eine Spannung proportional zu  $t^{-1}$ .

### TEM-Antwort der Bohrkernproben

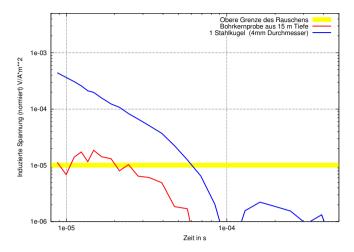
Auf der Altlast wurden drei jeweils 15 m tiefe Bohrungen durchgeführt. Aus jedem Meter gibt es 1 bis 2 Proben, deren TEM-Antwort gemessen wurde. Somit konnte die TEM-Antwort von ca. 50 Bohrkernproben aus drei Bohrlöchern der Altlast gemessen werden.

Die Transienten der Bohrkernproben wurden in drei Kategorien eingestuft:

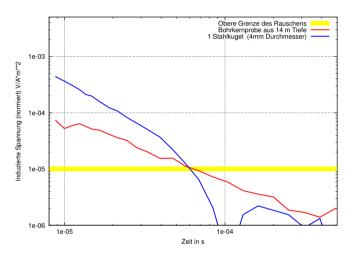
- 1. Kategorie: schwacher Transient (vgl. Abb. 5(a)): Das Signal kann nicht von Rauschen unterschieden werden.
- 2. Kategorie: mittlerer Transient (vgl. Abb. 5(b)): Das Signal hebt sich wenig, aber deutlich vom Rauschen ab. Diese Transienten scheinen teilweise langsamer abzufallen als die Transienten der Proben mit Stahlkugeln, was aber nur bei sehr wenigen Proben der Fall ist.
- 3. Kategorie: starker Transient (vgl. Abb. 5(c)): Das Signal ist sehr ähnlich zu den Kontrollproben mit den Stahlkugelproben.

Überraschend ist, dass sehr viele Bohrkernproben eine TEM-Antwort zeigen, wie in Abb. 6 zu sehen ist. Dies wurde aufgrund der Ergebnisse der Simulation der Messapparatur nicht erwartet.

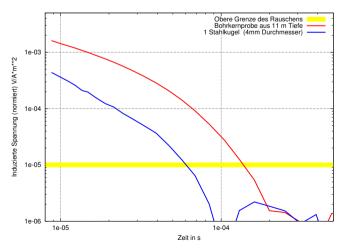
Dabei ist sowohl die Stärke als auch die Form der TEM-Antwort der Bohrkernproben deutlich ähnlicher zu den TEM-Antworten der Kontrollproben mit den Stahlkugeln als zu den Kontrollproben mit den superparamagnetischen Kontrollproben. Es liegt daher der Schluss näher, dass die gemessenen Transienten durch Metalleinschlüsse erzeugt werden. Allerdings ist es theoretisch denkbar, dass die TEM-Antworten der Bohrkernproben durch superparamagnetischen Boden erzeugt werden. Ein durch Superparamagnetismus induzierter exponentieller Abfall des Empfangssignals ist denkbar, wenn die Größenordnung der maximalen Zerfallskonstante  $\tau_2$  (vgl. Gl. 3) in der Größenordnung des Zeitfensters des Messbereiches liegt. In diesem Fall wäre die maximale Korngröße begrenzt.



(a) schwacher Transient, Bohrkernprobe aus 15 m Tiefe



(b) mittlerer Transient, Bohrkernprobe aus 14 m Tiefe



(c) starker Transient, Bohrkernprobe aus 11 m Tiefe

Abbildung 5: TEM-Antwort der Bohrkernproben der Kategorie 1,2 und 3

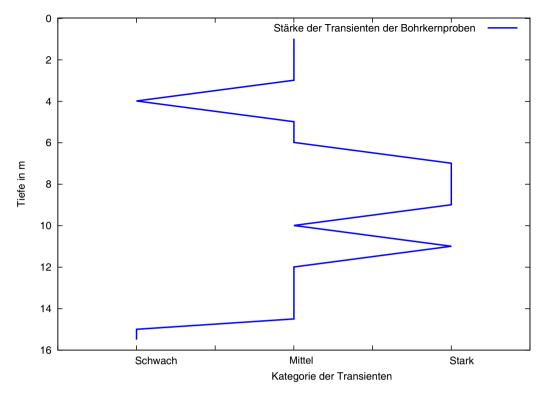


Abbildung 6: Kategorien der TEM-Antworten der Bohrkernproben des dritten Bohrloches

Im Gegensatz zu den bisherigen Messergebnissen bei *Barsukov und Fainberg* (2001), *Buselli* (1982) und den Kontrollproben mit superparamagnetischem Boden würde dieser Superparamagnetismus eine um Dekaden kleinere maxmiale Zerfallskonstante  $\tau_2$  haben.

Da die Stärke der Transienten von einigen Bohrkernproben in der Größenordnung der Stärke der Transienten der Kontrollproben mit 8 4mm Stahlkugeln liegen, ist davon auszugehen, dass die Metalleinschlüsse einige mm groß sein müssen. Nach dem Öffnen einer solchen ausgewählten Bohrkernprobe wurde tatsächlich ein Nagel gefunden.

## Diskussion

Die Messung von TEM-Antworten von Bodenproben ist mit einer neuen Laboranordnung erfolgreich durchgeführt worden. Die TEM-Antwort des superparamagnetischen Bodens zeigt im Einklang mit der Theorie (Gl. 4) einen Abfall von  $t^{-1}$ . Keine der Bohrkehrproben der Altlast zeigt einen Transienten ähnlich zu den den Kontrollproben mit superparamagnetischem Boden. Die meisten Bohrkehrproben zeigen Transienten ähnlich zu den Proben mit Stahlkugeln. Würden die TEM-Antwort der Bohrkernproben durch superparamagnetisches Material erzeugt werden, hätte dieser im Vergleich zu bisher beobachteten Superparamagnetismus eine deutlich niedrigere maximale Zerfallkonstante und damit eine deutlich niedrigere maximale Korngröße. Es ist daher schlüssiger anzunehmen, dass die TEM-Antwort der Bohrkernproben durch Metalleinschlüsse und nicht durch superparamagnetischen Boden erzeugt werden. Überraschend ist aber, wie viele Bohrlochproben einen messbaren Transienten erzeugen. Außerdem ist nach wie vor unklar, warum die auf der Deponie gemessenen Transienten an verschiedenen Orten einen sehr einheitlichen Verlauf zeigen. Wenn kleine Metallkörper die Ursache für den Verlauf der Transienten sind so müssen sie relativ homogen über die Deponie verteilt sein.

### Literatur

Barsukov, P. O. und E. B. Fainberg, Superparamagnetic effect over gold and nickel deposits, *Europ. J. Environ. Eng. Geophys.*, 6, 61–72, 2001.

**Buselli, G.**, The effect of near-surface superparamagnetic material on electromagnetic measurements, *Geophysics*, 47, (9), 1315–1324, 1982.

- Chikazumi, S., Physics of Magnetism, John Wiley, 2. Auflage, Juni 1966.
- Fils, M. F., G. A. Newman und G. W. Hohmann, Induced-polarization effects in time-domain electromagnetic measurements, *Geophysics*, *54*, (4), 514–523, 1989.
- **Gaidetzka, A., M. Goldman, S. L. Helwig und B. Tezkan**, Erste Erfahrungen mit der NanoTEM-Apparatur, *A. Hördt und J. Stoll (Her.) Protokoll über das 19. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung*, 2001.
- Lowrie, W., Fundamentals of Geophysics, Cambridge Univ. Press, 1997.
- **Recher, S.,** Dreidimesionale Erkundung von Altlasten mit Radiomagnetotellurik Vergleiche mit geophysikalischen, geochemischen und geologischen Analysen an Bodenproben aus Rammkernsondierungen, Dissertation, Köln, 2002.