

## Kurzperiodische LOTEM-Sendesignale

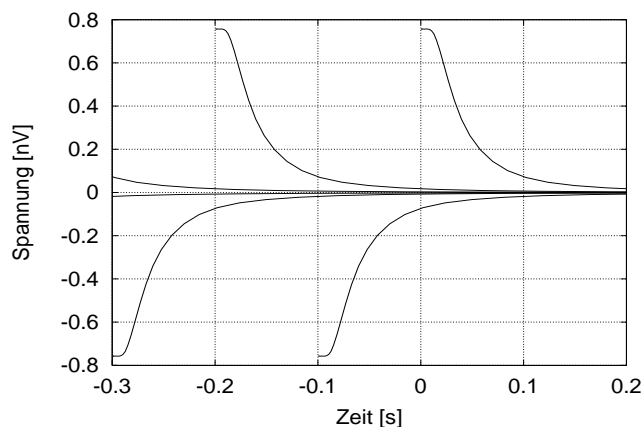
Carsten Scholl<sup>1</sup>, Andreas Hördt<sup>2</sup>

### Einleitung

Beim aktiven Messverfahren LOTEM (Long-Offset Transient Electromagnetics, *Strack* [1992]) dient ein mittels eines geerdeten Dipols in den Boden eingespeister Rechteckstrom als Sendesignal. Aus technischen Gründen wurden dabei bisher Signalperioden von einigen 10er Sekunden gewählt. Bei der Auswertung der so aufgezeichneten Zeitreihen konnte davon ausgegangen werden, dass die durch die einzelnen Umschaltvorgänge erzeugten transienten Signale innerhalb der halben Signalperiode abklingen und sich daher nicht überlagern.

Zur Steigerung der Produktivität einer Messung ist eine Verkürzung der Sendeperiode wünschenswert. Allerdings ändert sich dadurch das Abklingverhalten der Transienten. Damit ist zu erwarten, dass sich die Tiefenauflösungseigenschaften der Methode bei kürzeren Sendeperioden ändert, und zwar durch drei Effekte: Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses, Verkürzung des Transienten auf die Schaltzeit und die Überlagerung der einzelnen Schaltvorgänge. Die hier präsentierten Modellrechnungen zeigen, dass man je nach Fragestellung die zur Aufklärung einer bestimmten Schicht benötigte Messzeit durch geeignete Wahl der Sendeperiode minimieren kann.

### Berücksichtigung vorhergegangener Schaltvorgänge bei der Inversion



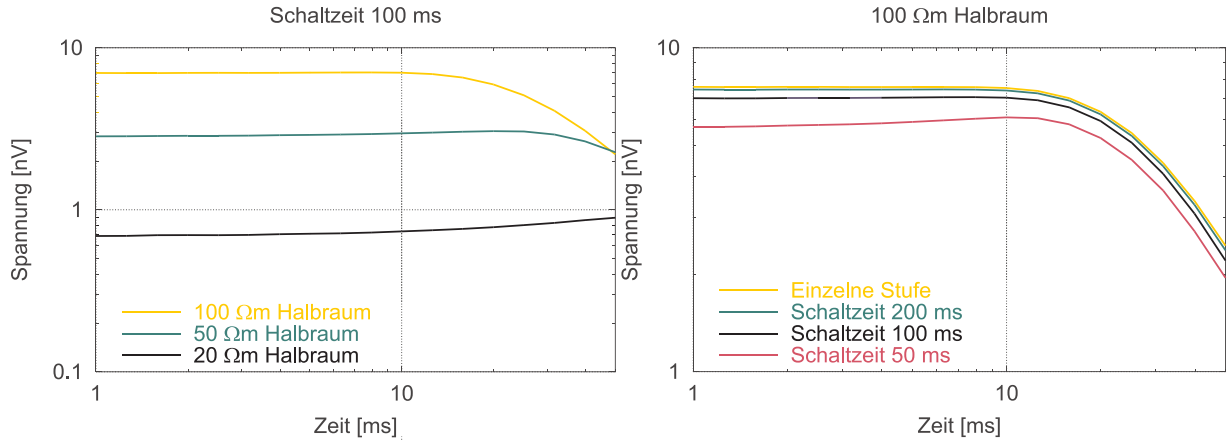
**Abbildung 1:** Einzelne  $\dot{H}_z$ -Transienten bei einer Schaltzeit von 100 ms.

Abbildung 1 zeigt die synthetischen Erdantworten für die vertikale magnetische Feldkomponente  $\dot{H}_z$  über einem  $100 \Omega\text{m}$  Halbraum für mehrere einzelne Schaltvorgänge. Die vorhergehenden Schaltvorgänge wurden dabei nicht berücksichtigt. Die Zeit zwischen zwei Schaltvorgängen (im Folgenden „Schaltzeit“) beträgt 100 ms. Wie man in der Abbildung erkennt, sind die durch die Umschaltvorgänge erzeugten Signale nach 100 ms noch nicht abgeklungen. Das Signal, das man am Empfänger messen wird, ist also eine Superposition der einzelnen Transienten.

Diese Überlagerung kann man bei der Berechnung der Vorwärtsdaten durch eine Summation über Signale der vorhergehenden Schaltvorgänge berücksichtigen. Sei  $f(\underline{m}, t)$  z.B. die  $\dot{H}_z$ -

<sup>1</sup>Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln

<sup>2</sup>Geologisches Institut, Fachrichtung Geophysik, Universität Bonn



**Abbildung 2:** Links sind die  $\dot{H}_z$ -Transienten über verschiedenen homogenen Halbräumen bei 100 ms Schaltzeit, rechts die nach Gleichung 1 berechneten  $\dot{H}_z$ -Transienten über einem homogenen 100  $\Omega\text{m}$  Halbraum für verschiedene Schaltzeiten dargestellt.

Erdantwort des Erdmodells mit dem Parametervektor  $\underline{m}$  und  $T_S$  die Schaltzeit, so ergibt sich

$$f_P(\underline{m}, t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n f(\underline{m}, t + nT_S) \quad (1)$$

Die Verzerrung, also die Differenz des Signals zu dem einer einzelnen Stufe, wird mit kürzer werdender Schaltzeit stärker (siehe Abb. 2, rechts). Da die Leitfähigkeit im Untergrund das Abklingverhalten steuert, hat auch das Erdmodell Einfluss auf die Stärke der Verzerrung. So sind die Abweichungen über einem 100  $\Omega\text{m}$ -Halbraum bei einer Schaltzeit von 100 ms kleiner, als die über einem 20  $\Omega\text{m}$ -Halbraum bei gleicher Schaltzeit, da die elektromagnetischen Felder über einem besseren Leiter langsamer abklingen (Abb. 2, links).

Man erkennt in der Abbildung auch, dass es sich nicht nur um eine konstante Verschiebung handelt, sondern dass die Kurveform durch die Überlagerung verändert wird. So sieht man in Abbildung 2 links für den 20  $\Omega\text{m}$ -Halbraum, dass der Transient hier - stärker als die Transienten für den 50 und den 100  $\Omega\text{m}$ -Halbraum - nach etwa 40 ms sogar ansteigt. Dieser Anstieg ist hauptsächlich auf den Abfall des Transienten des gegensinnigen Schaltsignals eine Schaltzeit vorher zurückzuführen, der sich mit der in diesem Zeitbereich noch konstanten Spannung - erzeugt vom hier betrachteten Schaltvorgang - überlagert. Der Abfall des Transienten folgt zu späteren Zeiten und ist nicht mehr abgebildet.

An dieser Stelle soll noch auf eine gebräuchliche Art periodischer Sendesignale hingewiesen werden: Bei VibroTEM [Helwig, 2000] werden periodisch sogenannte Pseudo-Random-Binary-Sequences (PRBS) [Golomb, 1964] gesendet. Bei der Auswertung wird - ähnlich zu Vibroseis [Crawford et al., 1960] - die Kreuzkorrelationsfunktion der aufgezeichneten Zeitreihen mit der anregenden PRBS berechnet. Das Ergebnis ist die Impulsantwort der Erde, gefaltet mit der (nahezu impulsförmigen) Autokorrelationsfunktion der PRBS.

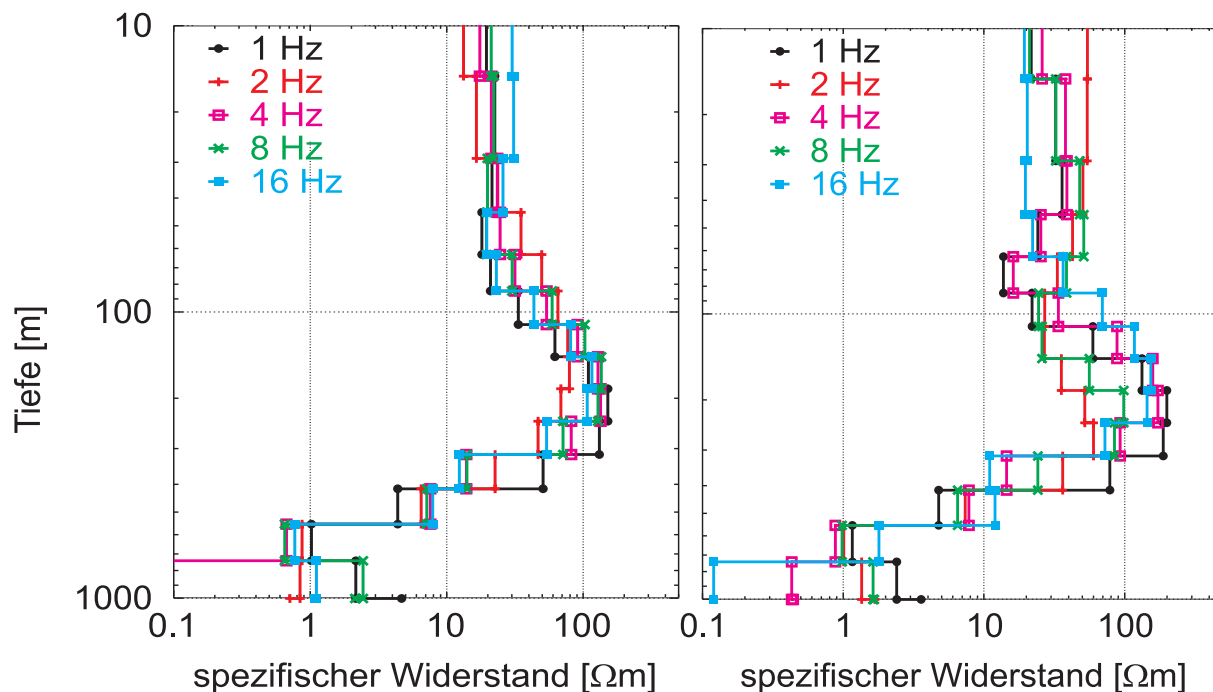
Das Ergebnis sind Transienten, deren Quelle sich periodisch wiederholende Deltaimpulse sind. Zum Vergleich mit herkömmlichen LOTEM-Transienten werden die Zeitreihen oft numerisch integriert, um so die Stufenantwort der Erde zu erhalten. Da die anregenden Deltaimpulse alle das gleiche Vorzeichen aufweisen, ist die anregende Funktion nach der Integration kein periodisches Stufensignal sondern ein treppenförmiges Signal. Will man hier die vorhergehenden Schaltvorgänge des Sendestroms mitberücksichtigen, wandelt sich Gleichung 1 zu:

$$f_V(\underline{m}, t) = \sum_{n=0}^{\infty} f(\underline{m}, t + nT_S) \quad (2)$$

Auf eine Betrachtung der Inversionseigenschaften derartiger Signale wird hier aus Platzgründen verzichtet. Sie findet man in *Scholl* [2001].

### Felddatenbeispiel

Während einer Messkampagne im Sommer 2000 am Vulkan Merapi<sup>1</sup> (Indonesien) wurde am Südhang des Berges u.a. eine CSAMT-Messung durchgeführt [Supriadi *et al.*, 2000]. Die Sendesignalform bei dieser Messung entsprach exakt dem LOTEM-Stufensignal, lediglich die Sendefrequenz war höher. An einer Station wurden die aus diesen Sendesignalen resultierenden E- und H-Felder von 1 Hz bis 8 kHz mit der LOTEM Empfängerapparatur aufgezeichnet. Die derart aufgezeichneten Signale wurden anschließend wie kurzperiodische LOTEM-Transienten invertiert.



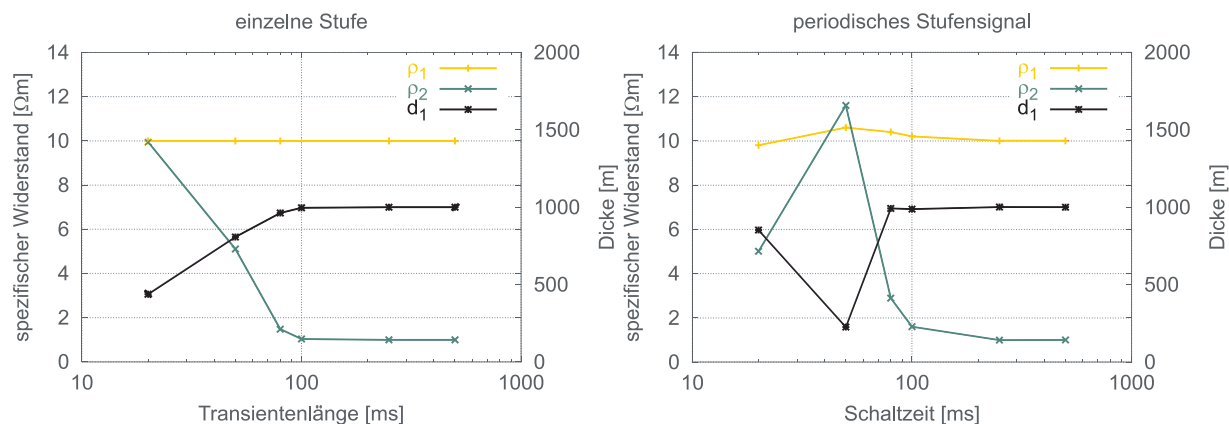
**Abbildung 3:** Ergebnisse der 1D-OCCAM-Inversionen der Felddaten für verschiedene Sendefrequenzen. Links wurde dabei die Periodizität des Sendesignals berücksichtigt, rechts nicht.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse von 1D-OCCAM-Inversionen der elektrischen Feldkomponente parallel zum Sender [Constable *et al.*, 1987] für die niedrigsten fünf Sendefrequenzen. Die Inversionsergebnisse für die Inversionen mit Korrektur der Vorwärtsdaten liegen bis zu einer Tiefe von 700 m deutlich näher beieinander als die ohne Korrektur. Die Annahme, dass sich die Verzerrung durch Superposition der einzelnen Signale beschreiben lässt, scheint also zuzutreffen.

### Der Einfluss auf die Erkundungstiefe

Durch die Veränderung der Periode des Sendesignals wird die maximale Erkundungstiefe [Spies, 1989], bis zu der noch verschiedene Erdschichten aufgelöst werden können, beeinflusst.

<sup>1</sup>Im Rahmen des DFG-Verbundprojektes MERAPI



**Abbildung 4:** Ergebnisse der Inversionen von synthetischen Daten; das zugrundeliegende Modell bestand jeweils aus einer 1000 m dicken Schicht mit 10 Ωm über einem 1 Ωm Halbraum. Die Mächtigkeit der ersten Schicht ist mit  $d_1$ , die Widerstände der beiden Schichten mit  $\rho_1$  und  $\rho_2$  bezeichnet. Links sind die Ergebnisse der Inversionen in Abhängigkeit von der Länge der invertierten Transienten für den aperiodischen Fall dargestellt. Rechts wurden die Transienten nach Gleichung 1 für unterschiedliche Schaltzeiten erzeugt und invertiert.

Drei Ursachen für eine Änderung der Tiefenauflösung sind möglich:

1. Die Transienten sind kürzer. Sei  $\mu$  die magnetische Permeabilität und  $\sigma$  die Leitfähigkeit des Untergrundes, dann gibt die Diffusionstiefe

$$\delta_{TD}(t) = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \quad (3)$$

an, in welcher Tiefe die Stromdichte zu einer Zeit  $t$  maximal ist, d.h. aus welcher Tiefe die größten Signalbeiträge zur Zeit  $t$  kommen. Die Erkundungstiefe eines  $t$  langen Transienten lässt sich als  $\delta_{TD}(t)$  abschätzen sofern man Rauscheinflüsse nicht berücksichtigt. Da sich das Signal nach der Schaltzeit umgekehrt wiederholt, liegen nur Datenpunkte bis zur Schaltzeit vor. Die Abschätzung über die Diffusionstiefe lässt also erwarten, dass die Transienten nur Informationen über Erdschichten bis zur Schaltzeit  $T_S$  entsprechenden Diffusionstiefe  $\delta_{TD}(T_S)$  liefern.

2. Durch die Überlagerung mit den Signalen vorhergegangener Schaltvorgänge ist durchaus auch der Verlauf des Erdantwort zu späteren Zeiten als  $T_S$  im Transienten vorhanden. Möglicherweise lassen sich dadurch auch Informationen über Erdschichten gewinnen, die tiefer liegen als  $\delta_{TD}(T_S)$ . Umgekehrt kann man vermuten, dass sich durch die Überlagerung Mehrdeutigkeiten ergeben und daher sogar flachere Strukturen bei der Inversion nicht mehr wiedergefunden werden.
3. Zur Verbesserung des Signal-zu-Rauschverhältnisses (SNR) werden bei LOTEM Messungen viele hundert Einzelmessungen (Umschaltvorgänge) durchgeführt und gestapelt. Das SNR verbessert sich bei  $N$  Einzelmessungen um  $\sqrt{N}$ . Durch die Erhöhung der Sendefrequenz lassen sich in derselben Zeit mehr Einzelmessungen durchführen und so das SNR weiter verbessern. Auch wenn dadurch die Transienten verkürzt werden, kann sich so doch der auswertbare Bereich, in dem Spannungswerte größer sind als das Rauschen, verlängern.

Um den Einfluss durch die in den ersten beiden Punkten beschriebenen Effekte abschätzen zu können, wurden zunächst synthetisch erzeugte Transienten invertiert. Den hier gezeigten

Inversionsergebnissen liegt ein Modell zugrunde, in dem eine 1000 m mächtige Schicht mit einem Widerstand von  $10 \Omega\text{m}$  über einem  $1 \Omega\text{m}$  Halbraum liegt. Die Zeit, nach der man ein Signal von der Schichtgrenze erwartet, beträgt nach Gleichung 3 etwa 63 ms.

Die Transienten wurden für verschiedene Schaltzeiten berechnet und invertiert. Zum Vergleich wurden Transienten ohne Berücksichtigung der Periodizität berechnet, den Schaltzeiten der periodischen Transienten entsprechend gekürzt und invertiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die Ergebnisse für den aperiodischen Fall entsprechen der Abschätzung über die Diffusionstiefe. Erst ab einer Transientenlänge von 80 ms wird das Ursprungsmodell wiedergefunden. Für eine Transientenlänge von 20 ms „sieht“ die Inversion nur den Widerstand der obersten Schicht. Für den periodischen Fall kann man ebenfalls feststellen, dass das Modell ab einer Schaltzeit von 80 ms gut wiedergegeben wird. Für kürzere Schaltzeiten ist das Bild aber uneinheitlicher. Bei 20 ms scheinen die Daten durchaus Informationen über eine besser leitende Schicht in der Tiefe zu enthalten (etwa vergleichbar mit den Ergebnissen für den 50 ms langen Transienten im aperiodischen Fall). Für 50 ms wird aber nur der Widerstand der ersten Schicht gefunden. Der Widerstand der zweiten Schicht und die Dicke der ersten weichen deutlich vom Originalmodell ab.

Eine Erklärung liefert die Betrachtung der Fehlerräume in Abbildung 5. Hierzu wurde jeweils für eine feste Kombination von  $\rho_1$  und  $\rho_2$  das  $d_1$  gesucht, mit dem die Daten am besten angepasst werden. Als Maß für die Anpassung wurde dabei der  $\chi$ -Wert gewählt. Dieser ist 1,0, wenn das erhaltene Modell die Daten innerhalb der angenommenen Fehlerbereiche erklärt. Erklärt ein Modell die Daten nicht, ist der  $\chi$ -Wert größer 1,0. Die  $\chi$ -Werte der besten Anpassungen wurden dann flächenhaft für die verschiedenen Parameterkombinationen  $\rho_1$  und  $\rho_2$  aufgetragen. Da hier der negative Logarithmus von  $\chi$  dargestellt ist, macht sich die beste Anpassung in der Abbildung als globales Maximum bemerkbar.

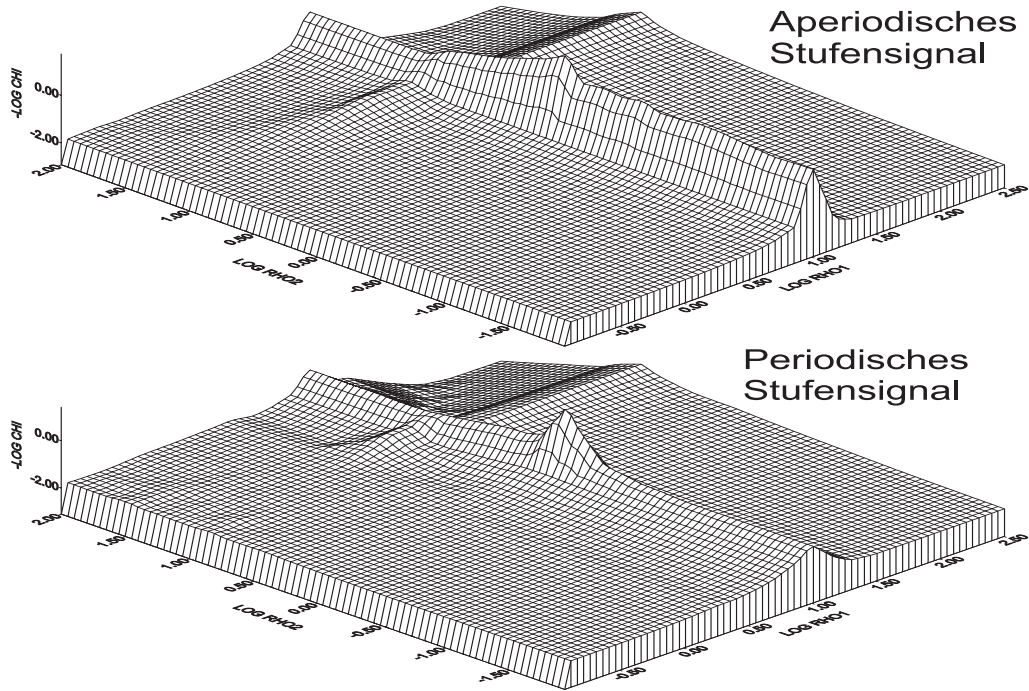
Ein Vergleich der beiden Teilgrafiken von Abbildung 5 zeigt, dass das globale Maximum bei  $\rho_1 = 10 \text{ m}$  und  $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$  im periodischen Fall deutlicher hervortritt als im aperiodischen Fall. Bei gleicher Transientenlänge scheinen im periodischen Datensatz also tatsächlich Informationen enthalten zu sein, die tiefer reichen, als im nichtperiodischen.

Das sich allerdings durch die Periodizität auch Probleme ergeben können, zeigt Abbildung 6. Hier wurde der gleiche Datensatz verwendet, allerdings wurden hier die Fehlerflächen nach dem oben beschriebenen Verfahren für die beiden Parameter  $d_1$  und  $\rho_2$  erstellt. Was sich in Abbildung 5 bereits andeutet, wird hier deutlicher: Die Fehlerfläche für den periodischen Fall stellt sich viel weniger glatt dar und weist mehr Rinnen auf als für den aperiodischen Datensatz. Dies erschwert es dem Inversionsalgorithmus, das globale Minimum von  $\chi$  bei  $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$  und  $d_1 = 1000 \text{ m}$  zu finden und führt wohl auch zum in Abbildung 4 gezeigten Ergebnis für eine Schaltzeit von 50 ms, das vom Originalmodell abweicht.

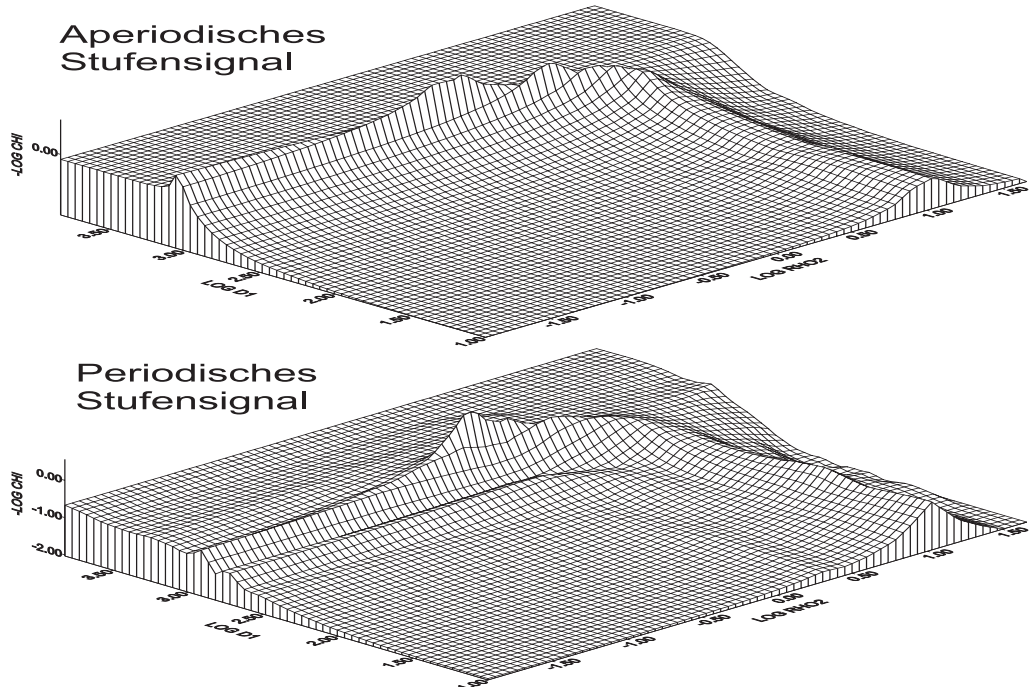
## Berücksichtigung von Rauschen

Für eine praxisnähere Betrachtung, die auch die bisher noch nicht berücksichtigten Rauscheinflüsse berücksichtigt, soll im Folgenden angenommen werden, dass das in Abbildung 7 dargestellte Modell erkundet werden soll. Die aufzuklärende vierte Erdschicht dürfte sich nach Gleichung 3 nach etwa 112 ms in den Transienten bemerkbar machen. Wie der im linken Teil der Abbildung dargestellte  $\dot{H}_z$ -Transient zeigt, sind die normierten Spannungen in diesem Zeitbereich bereits eine Größenordnung kleiner in den ersten 100 Millisekunden und werden somit leichter von Rauschen überdeckt.

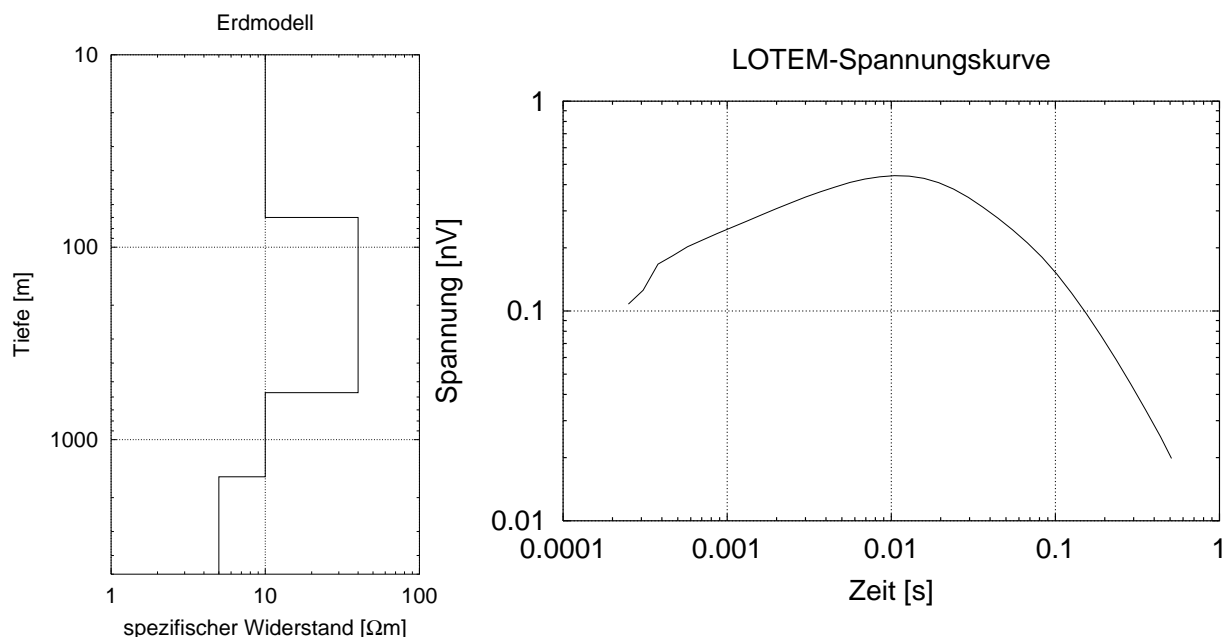
Mit den bisher verfügbaren Apparaturen ist keine kontinuierliche Aufzeichnung der von den



**Abbildung 5:** Auschnitte aus den Fehlerräumen für den aperiodischen Datensatz (oben) und den periodischen Datensatz (Schaltzeit 50 ms, unten); Auf der X-Achse ist der Logarithmus des Widerstandes der ersten Schicht  $\rho_1$ , auf der Y-Achse der Logarithmus des Widerstandes der zweiten Schicht  $\rho_2$ , auf der Z-Achse der negative Logarithmus von  $\chi$  aufgetragen. Die Beispieldatensätze wurde jeweils mit  $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$  und  $d_1 = 1000 \text{ m}$  erstellt.



**Abbildung 6:** Auschnitte aus den Fehlerräumen für den aperiodischen Datensatz (oben) und den periodischen Datensatz (Schaltzeit 50 ms, unten); Auf der X-Achse ist der Logarithmus des Widerstandes der zweiten Schicht  $\rho_2$ , auf der Y-Achse der Logarithmus der Dicke der ersten Schicht  $d_1$ , auf der Z-Achse der negative Logarithmus von  $\chi$  aufgetragen. Die Beispieldatensätze wurde jeweils mit  $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 1 \Omega\text{m}$  und  $d_1 = 1000 \text{ m}$  erstellt.



**Abbildung 7:** Im Beispiel verwendetes Erdmodell und dazugehöriger  $\dot{H}_z$ -Transient für ein nicht-periodisches Sendesignal; die Spannung ist dabei auf die Empfängerfläche und das Dipolmoment des Senders normiert.

elektrischen und magnetischen Sensoren gelieferten Spannungen möglich. Um eine Überlagerung der Signale einzelner Schaltvorgänge zu vermeiden, wurde daher immer nur ein Schaltvorgang pro aufgezeichnetem Zeitfenster durchgeführt. Aus gerätespezifischen Gründen wäre in diesem Fall eine Schaltzeit von 4,5 s gewählt worden.

	100 ms	145 ms	200 ms	4,5 s
Zeitreihe	10	7	5	1
15 min	1730	1211	865	200
1 h	6920	4844	3460	800
4 h	27680	19376	13840	3200
16 h	110720	77504	55360	12800

**Tabelle 1:** Anzahl der aufgezeichneten Schaltvorgänge nach bestimmten Zeiten bei unterschiedlichen Sendeperioden;

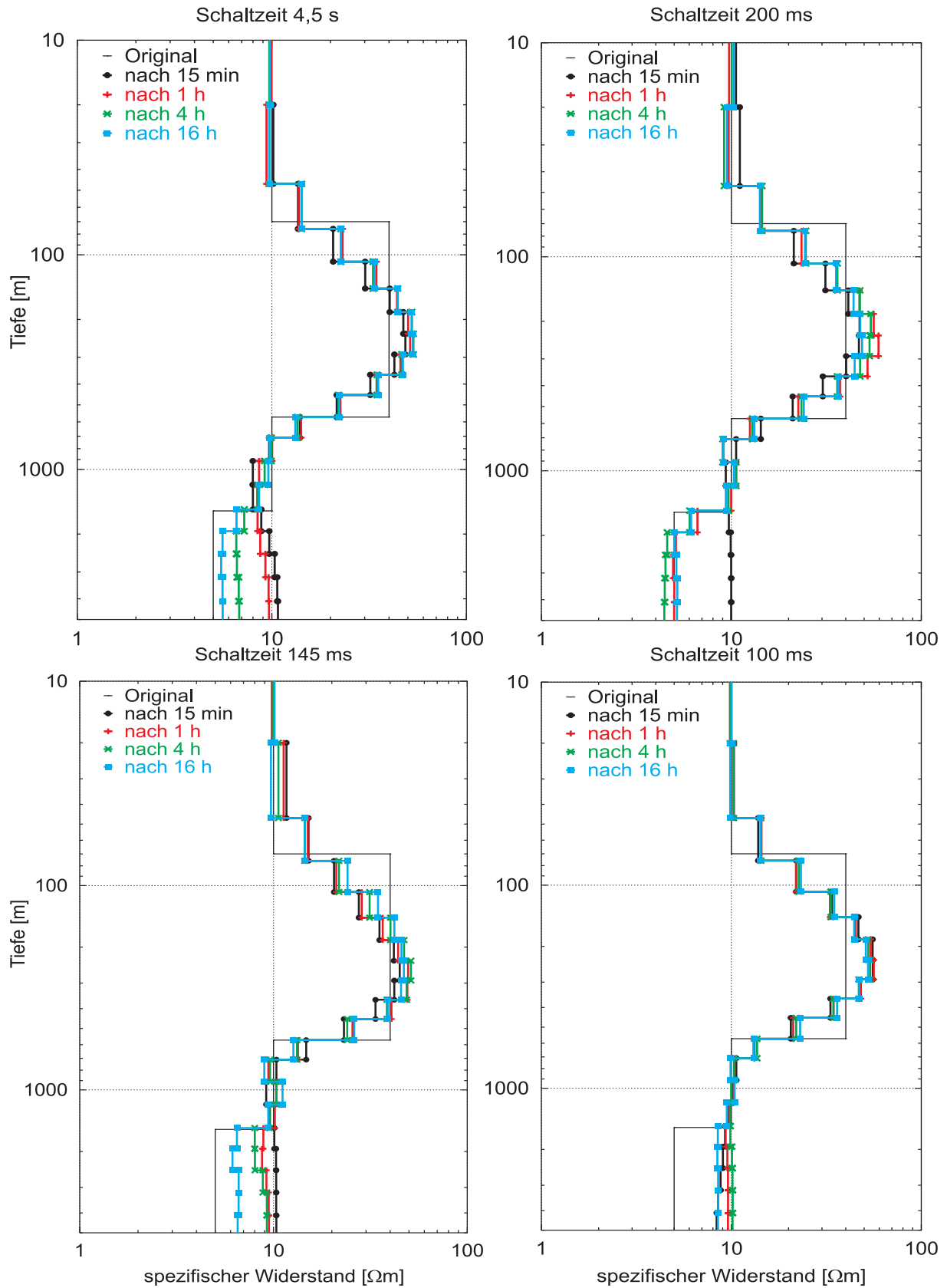
normalverteiltem Rauschen verrauscht. Die Standardabweichung der Verteilung wurde aus Erfahrungswerten vergangener Feldmessungen abgeleitet und mit der Anzahl der Einzelmessungen  $N$  nach  $1/\sqrt{N}$  kleiner. Die OCCAM-Inversionsergebnisse für die verrauschten Transienten sind in Abbildung 8 dargestellt.

Für den bisher üblichen Fall einer Schaltzeit von 4,5 s werden die ersten drei Schichten nach einer Viertelstunde richtig wiedergegeben. Die vierte Schicht deutet sich nach einer Aufzeichnungszeit von vier Stunden an, aber erst nach 16 Stunden wird das Ursprungsmodell wiedergefunden<sup>2</sup>. Für eine Schaltzeit von 200 ms wird das Ursprungsmodell bereits nach einer Stunde gut reproduziert. Eine weitere Verkürzung der Schaltzeit auf 145 ms verschlechtert die Tiefenauflösung wieder. Auch hier wird das Ausgangsmodell erst nach 16 Stunden Messzeit richtig

Nimmt man eine eventuelle Überlagerung in Kauf, kann man auch mehrere Schaltvorgänge in einem Zeitfenster zulassen. Die Anzahl der mit der verwendeten TEAMEX-Aufzeichnungsapparatur in bestimmten Zeiträumen registrierbaren Schaltvorgänge ist in Tabelle 1 für verschiedene Schaltzeiten aufgeführt.

Zunächst wurden für die verschiedenen Sendefrequenzen Transienten synthetisch erzeugt. Danach wurden die Datensätze mit

<sup>2</sup>Die dennoch zu erkennenden Abweichungen sind auf die in der OCCAM-Inversion eingehende Glättungsbedingung und die Diskretisierung in Erdschichten zurückzuführen.



**Abbildung 8:** Inversionsergebnisse der entsprechend der Anzahl der Einzelmessungen aus Tabelle 1 veranschauten synthetischen Transienten für die verschiedenen Schaltzeiten;



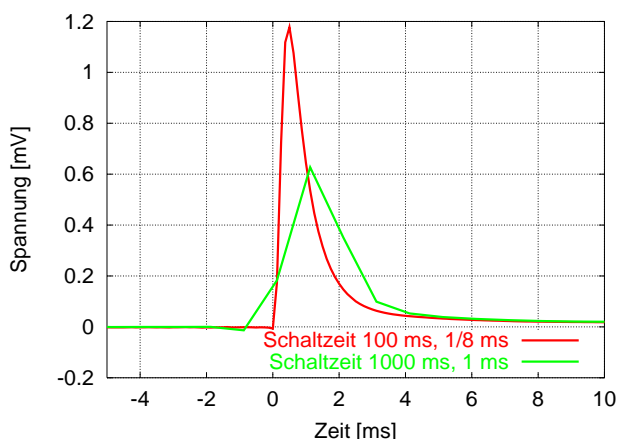
wiedergegeben. Dabei sollte die Länge des Transienten nach der Abschätzung über die Diffusionstiefe durchaus ausreichen (145 ms zu 116 ms). Für eine Schaltzeit von 100 ms schließlich wird die vierte Schicht auch nach 16 Stunden nicht von der Inversion wiedergefunden.

## Diskussion

Wie die Modellrechnungen zeigen, stellt die Inversion von kurzperiodischen Datensätzen den Inversionsalgorithmus mit angepasster Vorwärtsrechnung nicht vor Probleme. Die Tiefenauflösung wird durch die Überlagerung der Signale unterschiedlicher Schaltvorgänge nicht verschlechtert, lediglich die mit der Periodizität verbundene zeitliche Verkürzung der Transienten wirkt sich negativ aus. Betrachtet man die Fehlerräume, könnte man im Gegenteil sogar vermuten, dass die maximal erkundbare Tiefe größer ist als bei gleichlangen nichtperiodischen Transienten. Bei den Modellrechnungen unter Berücksichtigung des Rauschens zeigte sich allerdings, dass sich die besten Ergebnisse mit einer Schaltzeit erzielen lassen, die deutlich länger ist, als über die Abschätzung mit der Diffusionstiefe erfordert. Die Produktivität der Modellmessung konnte durch den Einsatz eines höherfrequenten Sendesignals deutlich verbessert werden.

## Weitere Anwendungsmöglichkeit

Bei einer Messung im Sommer 2001 an der Südflanke des Merapi sollte sowohl der Untergrund in den oberflächennahen Schichten als auch möglichst tief erkundet werden. Es waren somit sowohl späte Zeiten als auch eine gute zeitliche Auflösung zu frühen Zeiten gefragt.



**Abbildung 9:** Ausschnitt aus prozessierte  $\dot{H}_y$ -Transienten einer Station bei zwei unterschiedlichen Samplingraten und Schaltzeiten.

um den Umschaltvorgang. Man erkennt deutlich, dass der Peak zu Beginn des Transienten mit einem Abtastintervall von 1 ms nicht aufgelöst wird. Die mehr als doppelt so große Anzahl von Einzelmessungen verbessert hier hingegen die Datenqualität zu späten Zeiten. Die bessere zeitliche Auflösung des einen Transienten zu frühen Zeiten und die Länge des anderen lassen sich bei der Interpretation durch eine Joint-Inversion [Jupp und Vozoff, 1975] beider Datensätze kombinieren.

## Ausblick

Neben den hier demonstrierten Anwendungen hat die Verwendung höherfrequenter Sendesignale bei LOTEM weitere Vorteile [Scholl, 2001]:

Zu Anfang der Messung wurde daher mit einem Abtastintervall von  $1/8$  ms und einer Schaltzeit von 1 s aufgezeichnet. Nach sechs Stunden Messzeit erhält man so 7200 Einzelmessungen. Später wurde die Messstrategie geändert: Zunächst wurde 5,5 Stunden mit einer Abtastrate von 1 ms und einer Schaltzeit von 1 s aufgezeichnet. Damit wurden 15840 Schaltvorgänge registriert. Danach wurden in einer halbe Stunde 6000 Schaltvorgänge mit  $1/8$  ms Abtastintervall und einer Schaltzeit von 100 ms aufgezeichnet.

Abbildung 9 zeigt zwei prozessierte  $\dot{H}_y$ -Transienten einer Station für die beiden Schaltzeiten und Abtastraten im Zeitbereich

- Das Signal läßt sich an die im Messgebiet gegebenen Rauschverhältnisse besser anpassen.
- Der Feldaufbau variabler gestaltet werden, da die Signalperiode nicht mehr von der langsamsten Empfängerapparatur abhängt. Schnellere Spreads können so in der gleichen Zeit mehr Transienten aufzeichnen, als langsamere.
- Es entfällt der Zwang zur „Synchronisation“ [Helwig, 2000] der einzelnen Empfängerspreads mit dem Sender, da in den aufgezeichneten Zeitfenstern immer mehrere Schaltsignale enthalten sind. Das macht einen Wechsel des Sendesignals während des Messtages einfacher und den Gesamtaufbau Störungsunanfälliger.
- Die  $\sqrt{N}$  Abhängigkeit für das SNR gilt nur für normalverteiltes Rauschen. Bei vielen Felddaten hat sich bisher eine große Anzahl an Transienten als günstiger herausgestellt.
- Mit der Entwicklung neuer Empfängerapparaturen, die zur kontinuierlichen Aufzeichnung fähig sind [Helwig, 2001], wird sich die Schaltzeit nicht mehr auf die Trägheit des Empfängers beziehen können. Spätestens dann wird man sich bei jeder Messung die Frage nach einer dem Problem angepassten Sendeperiode stellen müssen.

## Literatur

- Constable, S. C., R. L. Parker und C. G. Constable**, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52, 289–300, 1987.
- Crawford, J. M., W. E. Doty und M. R. Lee**, Continuous signal seismograph, *Geophysics*, 25, 95–105, 1960.
- Golomb, S.**, *Digital communications*, Prentice Hall, New York, 1964.
- Helwig, S. L.**, *VIBROTEM*, Dissertation, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, 2000.
- Helwig, S. L.**, *Konzept für einen modularen EM-Empfänger*, in diesem Kolloquiumsband, 2001.
- Jupp, D. L. B. und K. Vozoff**, Stable iterative methods for the inversion of geophysical data, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42, 957–976, 1975.
- Scholl, C.**, Die Periodizität von Sendesignalen bei Long-Offset Transient Electromagnetics, Diplomarbeit, Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, April 2001.
- Spies, B. R.**, Depth of investigation in electromagnetic sounding methods, *Geophysics*, 54, 872–888, 1989.
- Strack, K. M.**, *Exploration with deep transient electromagnetics*, Methods in Geochemistry and Geophysics, Bd. 30, Elsevier, Amsterdam, 1992.
- Supriadi, S., D. Sutarno, L. Hendrajaya und D. Santoso**, Controlled-source audiomagnetotellurics (CSAMT) surveys at Merapi volcano, in *DGG-Mitteilungen*, herausgegeben von A. Hördt und J. B. Stoll, Dt. Geophys. Gesellschaft, 2000.