

E. STEVELING

Magnetotellurische Langzeitregistrierungen in Deppoldshausen bei Göttingen

Die Meßstation Deppoldshausen (DEP) liegt ca. 7 km nordöstlich von Göttingen in einer Waldlichtung auf einem Muschelkalkplateau (geogr. 51°35,5'N/9°59,5'E). Um Magnetotellurik-Apparaturen unter Feldbedingungen zu testen und neue Mitarbeiter mit den Geräten vertraut zu machen, werden seit 1976 an dieser Stelle immer wieder magnetotellurische Sondierungen durchgeführt, so daß von hier das umfangreichste Registriermaterial des Göttinger Raumes vorliegt.

Solaranlage

Zusätzlich wurde von Januar bis November 1983 in Deppoldshausen die Stromversorgung einer Magnetotellurik-Apparatur mit Solaranlagen getestet. Die äußeren Bedingungen waren nicht ganz ideal, da die Solarpaneele bei tiefstehender Sonne in den Schatten des Hochwaldes gerieten. Die am Institut für Geophysik in Göttingen mit einem Sonnenscheinautographen nach Campbell-Stoker gemessene monatliche Sonnenscheindauer zeigt, daß das Jahr 1983 im Vergleich zum Mittelwert nicht ungewöhnlich sonnig war (Tabelle 1).

	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov
d (1983)	0,06	2,0	1,8	2,9	2,8	6,1	7,0	6,1	3,7	2,5	1,8 h
\bar{d} (1891-1930)	1,6	2,5	3,5	5,1	6,8	6,6	6,1	5,7	4,3	3,1	1,6 h

Tabelle 1: Mittlere tägliche Sonnenscheindauer d in Stunden für Göttingen im Jahr 1983 und gemittelt über die Jahre 1891-1930 (\bar{d} aus: Klimakunde des Deutschen Reiches, Bd. II, Berlin 1939)

Jede der beiden parallelgeschalteten Solaranlagen besteht aus einem Solarpanel mit integriertem Spannungsregler (Siemens SFH 140-36R) und 2 Pufferbatterien (VARTA bloc Vb615). Bei voller Sonneneinstrahlung hat jede Anlage 33 W elektrische Leistung

bei einer Ausgangsspannung von ca. 12V DC. Die Pufferbatterien sind Bleiakкумуляtoren, haben eine Kapazität von 40 Ah, werden bei Sonnenschein von den Solarpanelen nachgeladen und übernehmen in den Zeiten ohne Sonnenschein die Stromversorgung. Die Solarpaneele wurden ungefähr nach Süden ausgerichtet, und mit einem Winkel von ca. 50° gegen die Horizontale geneigt aufgestellt.

Ein EDA-Fluxgatemagnetometer, 2 Tellurikverstärker und eine digitale Kassettenaufzeichnungsapparatur mit einer mittleren Leistungsaufnahme von etwa 3 W waren an die beiden Solaranlagen angeschlossen. Neben den 3 erdmagnetischen und 2 ird-elektrischen Komponenten wurden die Temperaturen im Fluxgatesensor und in der Fluxgate-Elektronikbox sowie die Batteriespannung registriert. Außerdem wurde in Abständen von 1 - 3 Wochen die Dichte der Schwefelsäure in den Akkumulatoren gemessen.

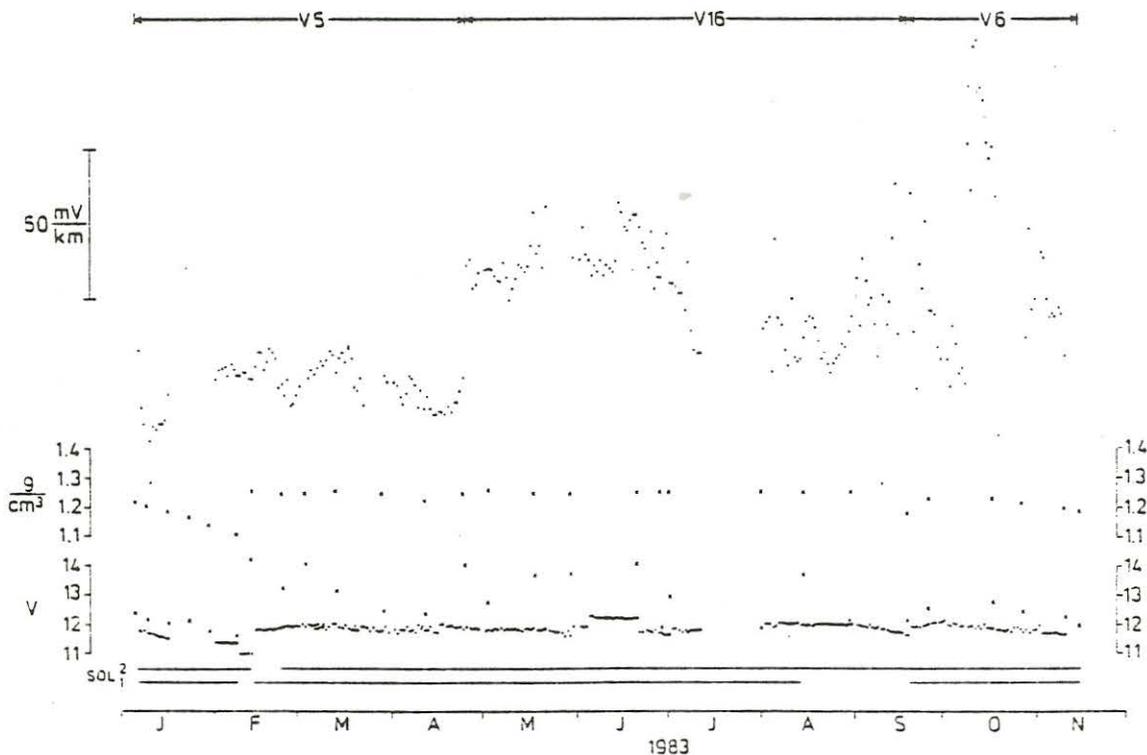


Abb. 1: Elektrische Spannung, Säuredichte der Akkumulatoren und Stabilität eines Tellurik-Verstärkers während eines Tests der Solaranlagen SOL1 und SOL2 in Deppoldshausen.

Einige Ergebnisse dieser Langzeitbeobachtungen sind in Abb. 1 zusammengestellt. Über der Zeitskala von Januar bis November 1983 ist angegeben, welche der beiden Solaranlagen SOL1 und SOL2 angeschlossen war. Darüber folgen dann die Batteriespannung, die Säuredichte und die auf die Sondeneingangsspannung umgerechneten Signale der EW-Tellurikverstärker V5, V16 bzw. V6. Alle aus Registrierungen abgeleiteten Ergebnisse sind Stundenmittelwerte um Mitternacht.

Ab Anfang Januar ist zu erkennen, daß die registrierte Batteriespannung (dichte Folge von Punkten) und die am Tage vorgenommenen Einzelmessungen der Batteriespannung (Kreuze unmittelbar darüber) ständig abnehmen. Noch besser ist die Abnahme der Batterieladung am Verlauf der Säuredichte zu beobachten. Offenbar konnten die Solarpaneele im Januar die Stromversorgung noch nicht sicherstellen, so daß Mitte Februar zunächst die Batterien von SOL1 und dann jene von SOL2 mit einem Ladegerät nachgeladen werden mußten. Von diesem Zeitpunkt an war dann kein weiteres externes Nachladen erforderlich, d.h. die Solaranlagen arbeiteten wartungsfrei bis Mitte November.

Als beste Indikatoren für den Ladezustand der Batterien erwiesen sich die Mitternachtswerte der Spannung und die Säuredichte. Wie nicht anders zu erwarten, werden Einzelmessungen der Batteriespannung am Tage zu sehr durch die angeschlossenen Solarpaneele verfälscht. Der Versatz der Batteriespannung im Juni ist durch einen Ausfall des Fluxgatemagnetometers zu erklären. Ab Mitte August wurde versucht, mit nur einer Solaranlage zu registrieren. Der anschließend beobachtete Spannungsabfall ließ es dann aber als ratsam erscheinen, die zweite Anlage Mitte September wieder zuzuschalten.

Die Punktwolke oben in Abb. 1 zeigt die Stabilität von 3 Tellurikverstärkern V5, V16 und V6. Die Bandbreite der Schwankungen bei V5 beträgt auf den Eingang bezogen etwa 20 mV/km und ist durchaus zufriedenstellend, wenn man berücksichtigt, daß natürliche Variationen nicht eliminiert wurden. V16 ist anfangs ebenso gut, doch ab Anfang Juli nimmt die Streuung zu, und

sie wird dann auch durch den Einsatz von V6 eher noch größer. Es wird vermutet, daß diese Verschlechterung durch allmähliche Korrosion der Tellurikkabelstecker verursacht wurde.

Magnetotellurik

Für die im folgenden dargestellten Ergebnisse wurden ausschließlich digitale Aufzeichnungen der in Tabelle 2 zusammengestellten Zeiten berücksichtigt.

Gruppe	Zeitintervall	Magnetometer	Tellurikverstärker
1a	25.10.-22.12.1978	Fluxgate 950	V3, V4
2a	6. 1.-18. 5.1983	" 3356	V5, V6, V12, V16
3a {	18. 5.-21. 6.1983	" 793	V12, V16
	21. 6.-15.11.1983	951	V6, V12, V16
1b	15.11.- 2.12.1978	Induktion 5	V5, V6
2b	26.10.-30.10.1981	" 4	V3, V4
3b	21. 6.- 6. 7.1983	" 4	V23, V24

Tabelle 2: Ausgewertete Meßzeiten der Station Deppoldshausen

Aus dem Registriermaterial wurden die besten 140 Variationsintervalle (Fluxgatemagnetometer) und 159 Pulsationsintervalle (Induktionsmagnetometer) ausgewählt. Die Gesamtlänge der unterschiedlich langen Zeitintervalle betrug für Variationen etwa 1200 Stunden und für Pulsationen etwa 35 Stunden. Ausgewertet wurde nach dem von SCHMUCKER (1978) angegebenen Verfahren.

Die summierten Fourier-Produkte wurden bei den Variationen mit Parzenfenstern im Frequenzabstand $\Delta f = 0.125, 0.25, 0.50, 1.0, 2.0$ cph und bei den Pulsationen im Abstand $\Delta f = 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6$ cpm geglättet. Frequenzabstand und Fensterbreite waren identisch. Für die weitere Auswertung benutzt wurden im allgemeinen die Frequenzen $3\Delta f$ und $4\Delta f$, also insgesamt etwa 20 Frequenzen.

Unter Berücksichtigung aller ausgewählten Effekte wurden die beiden $\rho^*(z^*)$ -Kurven in Abb. 2 berechnet. Der Bereich 9.4-300s stammt aus der Pulsations-, der Bereich 450-14400s aus der

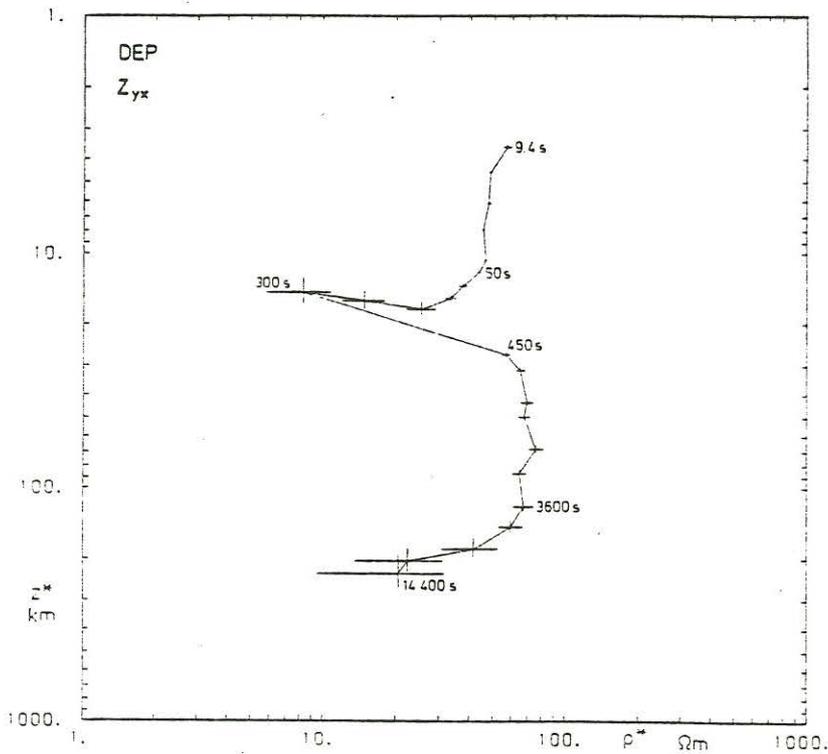
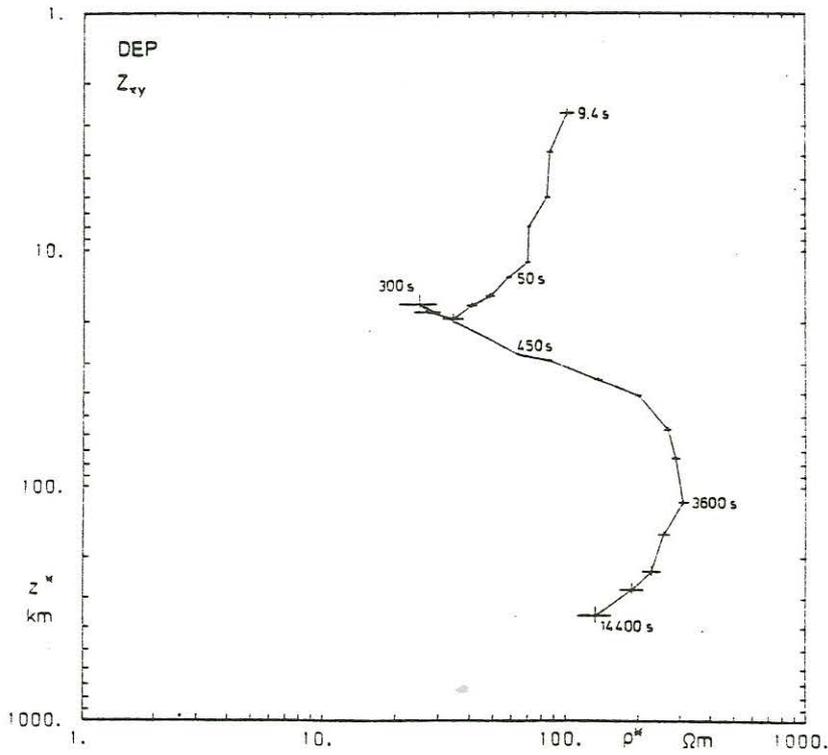


Abb. 2: Aus 140 Variations- und 159 Pulsationsintervallen für die beiden Nebendiagonalelemente Z_{xy} und Z_{yx} des Impedanztensors berechnete $\rho^*(z^*)$ -Verteilungen.

Variations-Analyse. Die überwiegend sehr kleinen Fehlerbalken, die zunächst für ein gutes Ergebnis sprechen, sind in erster Linie auf die hohe Anzahl von Freiheitsgraden, z.B. $\nu = 15153$ für $T = 9.4s$, zurückzuführen. Auf jeden Fall unbefriedigend ist der schlechte Anschluß der Kurven von $T = 300s$ nach $T = 450s$, also der Übergangsbereich Pulsationen-Variationen.

Um die Ursache dieser Diskrepanz zu untersuchen, wurde das gesamte Datenmaterial, wie in Tabelle 2 angegeben, in 3 Gruppen unterteilt und getrennt analysiert. Die Folge waren drei $\rho^*(z^*)$ -Kurven, die sich insbesondere im Pulsationsbereich sehr viel stärker voneinander unterschieden, als auf Grund der berechneten Fehler zulässig war.

Die weiteren Untersuchungen zeigten, daß die Kohärenz zwischen den elektrischen und magnetischen Feldern einen wesentlichen Einfluß auf die Größe der berechneten magnetotellurischen Größen hat. Um Datengruppen mit gleicher Anzahl von Freiheitsgraden untereinander vergleichen zu können, wurden deshalb die Pulsationseffekte auf 58 Gruppen mit einer aufsummierten Zeitreihenlänge von je 30 Minuten und die Variationseffekte auf 48 Gruppen zu je 24 Stunden verteilt und wiederum gruppenweise analysiert. Man erhält so aus den Pulsationen 2×58 und aus den Variationen 2×48 frequenzabhängige komplexe Eindringtiefen C .

Für die Z_{xy} -Impedanz und 5 Frequenzen ist $Re(C)$ als Funktion der Kohärenz Coh in Abb. 3 dargestellt. Bei 1.0 und 2.0 cph liegt die Kohärenz aller 48 Gruppen über 0.95, ein Indiz dafür, daß die Übertragungsfunktionen für diese Frequenzen immer gut bestimmbar sind. Bei den 3 übrigen Frequenzen kommen häufig Gruppen mit niedriger Kohärenz vor. Wichtig ist dabei, daß mit fallender Kohärenz eine mehr oder weniger deutliche Tendenz zu einer unterschätzten Eindringtiefe C zu beobachten ist. Die Ursache für diesen systematischen Fehler liegt wohl darin, daß bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen das Magnetfeld nicht immer als rauschfrei angenommen werden darf.

Das Signal-Rausch-Verhältnis des Magnetfeldes ist für Pulsationen vergleichsweise niedrig, so daß die Gefahr einer Unterschätzung von C dort besonders groß ist.

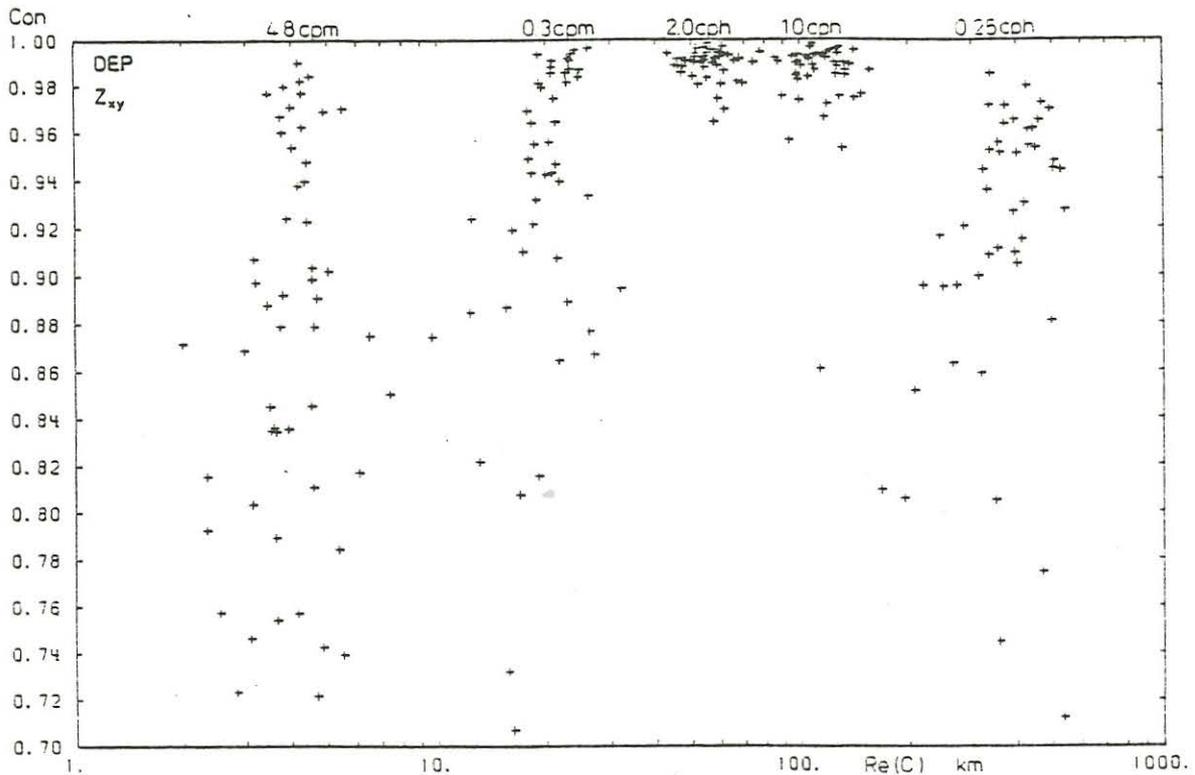


Abb. 3: Aus Z_{xy} berechneter Realteil der Eindringtiefe C als Funktion der Kohärenz Coh für verschiedene Frequenzen.

Um eine Verbesserung der Übertragungsfunktionen zu erreichen, wurden nun für jede Frequenz die magnetotellurischen Größen nach der Kohärenz sortiert, und zwar unabhängig für Z_{xy} und Z_{yx} . Die $\rho^*(z^*)$ -Bestimmungen für die 10 Gruppen mit der höchsten Kohärenz innerhalb der 21 Frequenzen, d.h. 210 (ρ^* , z^*)-Punkte, sind sowohl für Z_{xy} als auch für Z_{yx} in Abb. 4 dargestellt. Gemessen an der geringen Anzahl von Effekten innerhalb jeder Gruppe ist die Streuung der Punkte nicht groß.

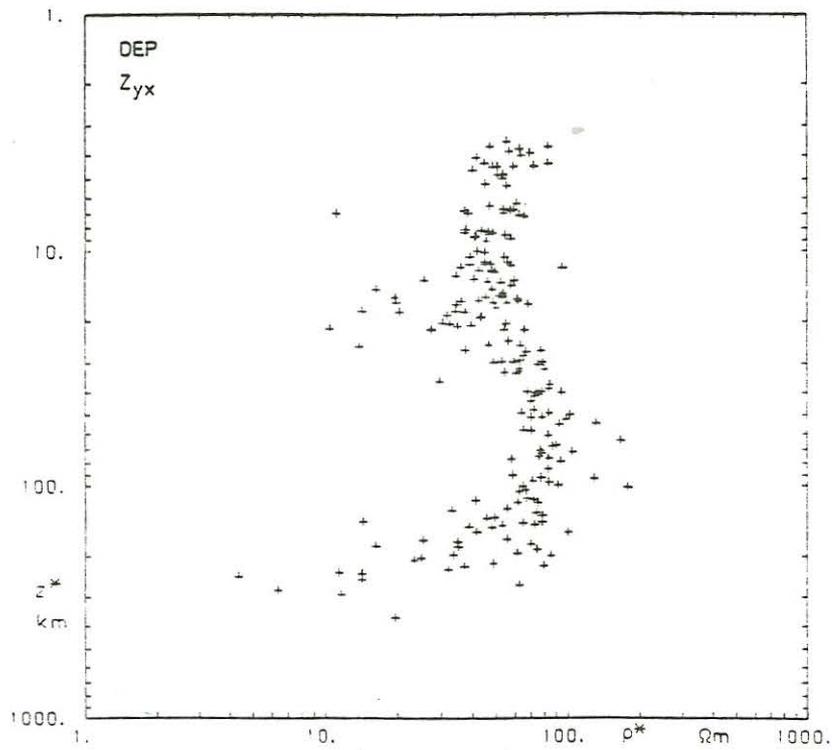
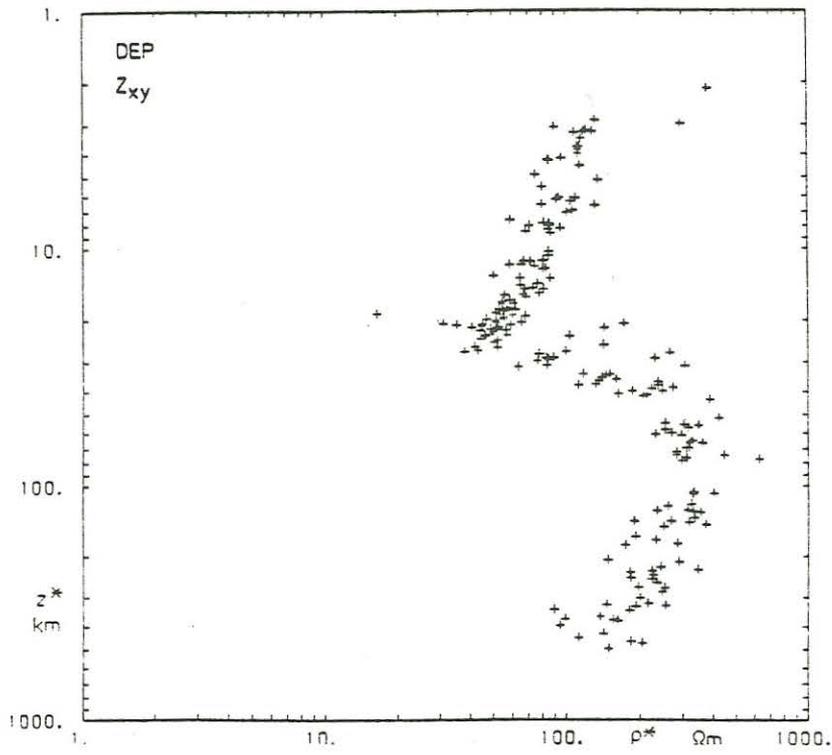


Abb. 4: $\rho^*(z^*)$ -Werte der jeweils 10 Gruppen mit der höchsten Kohärenz für insgesamt 21 Frequenzen.

In einem letzten Schritt wurden nun innerhalb der jeweils 10 Gruppen (wiederum getrennt für jede der 21 Frequenzen) jene Einzeleffekte zusammengefaßt, die gleichzeitig in den bisher getrennten Z_{xy} - und Z_{yx} -Gruppen vertreten waren. Nur diese Effekte wurden in eine abschließende Analyse eingebracht. Die Mittelung erfolgt also über eine Aufsummierung der Spektren und weicht daher von einer Mittelung der Punkte in Abb. 4 ab.

Einige Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Zusätzlich aufgelistet sind die ergänzenden Resultate einer Sq-Analyse, die aus - in Tabelle 2 nicht erfaßten Registrierungen - von JUNGE (1982) gemacht wurden. Die aus den Tabellenwerten berechneten $\rho^*(z^*)$ -Kurven sind in Abb. 5 wiedergegeben. Entscheidend verbessert sind diese Kurven im Vergleich zu jenen in Abb. 2 im Bereich der langperiodischen Pulsationen bis 300s. Da die verbesserten ρ^* - und z^* -Werte aus einer wesentlich geringeren Anzahl von Effekten berechnet wurden, sind entsprechend der kleineren Anzahl von Freiheitsgraden die Fehlerbereiche größer, aber wohl auch realistischer geworden. Die von JUNGE (1982) aus Sq-Analysen berechneten Werte im Periodenbereich 15709-57600s schließen gut an die langperiodischen Variationen an.

Etwas kritisch ist immer noch der Übergangsbereich Pulsationen-Variationen. Gerade dort, bei $z^* \approx 20$ km, muß zur Deutung der Kurven ein guter Leiter angenommen werden. Die Tendenz der kurzperiodischen Variationsergebnisse auf den aus Pulsationen ermittelten (ρ^*, z^*) -Punkt für 300s ist eindeutig. Es wäre jedoch wünschenswert zu zeigen, daß die aus Pulsationen mit Perioden $T > 300$ s ermittelten Widerstände zunehmen, und so eine bessere Überlappung von Pulsationen und Variationen erreicht wird.

T (s)	Z_{xy}						Z_{yx}							
	Re(C) (km)	-Im(C) (km)	ΔC (km)	ρ_a (Ωm)	$\Delta \rho_a$ (Ωm)	ϕ (grd)	$\Delta \phi$ (grd)	Re(C) (km)	-Im(C) (km)	ΔC (km)	ρ_a (Ωm)	$\Delta \rho_a$ (Ωm)	ϕ (grd)	$\Delta \phi$ (grd)
9,4	3,08	6,03	0,11	38,7	1,2	27,1	0,9	3,98	5,58	0,11	39,5	1,3	35,5	0,9
12,5	3,98	7,40	0,12	44,6	1,3	28,3	0,8	4,68	5,97	0,10	36,3	0,9	38,1	0,7
18,8	6,39	9,47	0,22	55,0	2,1	34,0	1,1	6,62	8,19	0,12	46,8	1,0	39,0	0,6
25,0	8,10	10,6	0,33	56,4	2,8	37,3	1,4	8,47	9,31	0,19	50,0	1,5	42,3	0,9
37,5	11,7	13,6	0,4	68,2	3,0	40,7	1,3	11,6	11,4	0,4	55,5	2,9	45,4	1,5
50,0	13,6	14,4	0,6	61,9	4,0	43,3	1,9	13,1	12,7	0,6	52,3	3,4	45,9	1,9
75,0	16,6	16,9	0,5	58,9	2,7	44,5	1,3	15,7	15,8	0,6	52,4	2,7	44,9	1,5
100	20,1	19,4	0,9	61,8	4,0	46,1	1,9	17,4	18,7	1,2	51,7	4,9	42,9	2,7
150	23,3	21,2	2,3	52,2	7,5	47,8	4,1	19,3	19,2	3,3	38,9	9,5	45,2	7,0
200	23,1	24,8	1,9	45,2	5,2	43,0	3,3	21,0	21,0	2,5	34,7	5,8	45,0	4,8
300	24,0	30,3	2,6	39,4	5,2	38,4	3,8	21,7	23,8	4,5	27,3	7,6	42,3	8,0
600	26,6	50,1	0,7	42,3	1,0	27,9	0,7	30,1	45,0	0,9	38,5	1,3	33,8	1,0
900	32,9	73,1	1,1	56,4	1,5	24,2	0,8	40,0	61,3	1,3	47,0	1,6	33,1	1,0
1200	37,7	94,0	1,2	67,4	1,6	21,9	0,7	52,5	72,1	2,2	52,4	2,5	36,1	1,4
1800	56,4	134	2,0	93,0	2,5	22,8	0,8	68,5	94,5	3,7	59,7	3,8	36,0	1,8
2400	78,5	171	4,1	116	5	24,7	1,3	85,7	109	6	63,4	5,4	38,1	2,5
3600	115	219	6,8	134	7	27,7	1,6	126	122	10	67,6	7,7	45,8	3,3
4800	156	264	10	155	10	30,5	1,8	146	140	12	67,2	8,0	46,1	3,4
7200	252	293	16	163	14	40,7	2,4	236	171	35	93,2	22,6	54,0	6,9
9600	320	330	25	176	19	44,1	3,1	285	131	53	82,2	27,8	65,3	9,7
14400	407	323	55	148	31	51,6	6,1	231	167	77	44,6	24,1	54,2	15,5
11520	231	397	56	144	35	30,2	6,9	197	167	67	45,5	23,5	49,7	14,8
13292	317	480	64	197	44	33,4	6,3	216	194	66	50,0	22,7	48,0	13,0
15709	348	339	63	119	31	45,7	7,5	245	222	55	55,0	18,3	47,8	9,5
19200	490	393	65	162	34	51,3	5,9	254	197	69	42,5	18,3	52,1	12,3
24686	538	342	77	130	32	57,6	7,0	308	228	72	46,9	17,5	53,5	10,7
34560	567	271	110	90,1	32	64,4	10,0	429	179	124	49,4	26,4	67,3	15,3
57600	775	324	228	96,6	53	67,3	15,6	452	124	225	30,1	28,9	74,7	27,5

Tabelle 3: Komplexe Eindringtieftiefen C, scheinbare Widerstände ρ_a und Phasen ϕ mit Angabe der Fehler für Deppoldshausen. Pulsationen 9,4-300 s; Variationen 600-14400 s; Sq-Analyse (JUNGE) 11520-57600 s. Hauptdiagonalelemente siehe im Anhang, Tabelle 4.

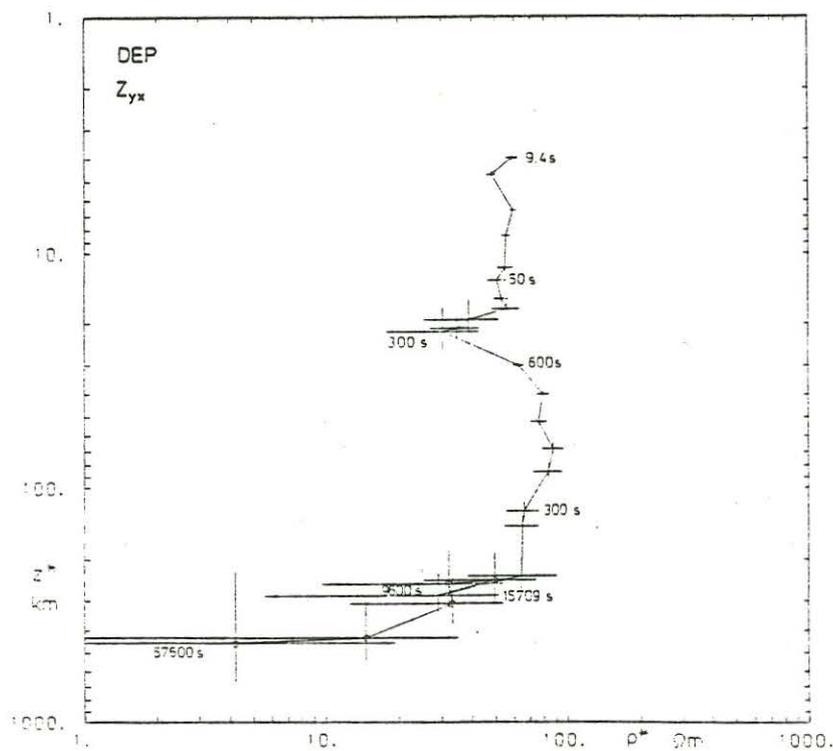
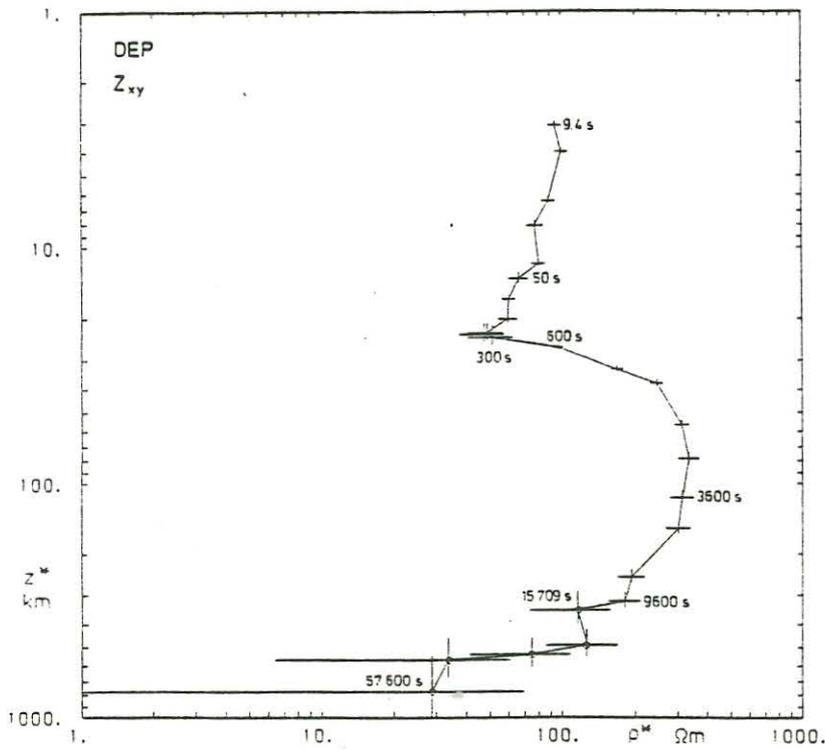


Abb. 5: $\rho^*(z^*)$ -Kurven ermittelt aus Effekten mit der höchsten Kohärenz zwischen elektrischem und magnetischem Feld. Die mit einem Kreis gekennzeichneten Punkte wurden von JUNGE (1982) aus einer Sq-Analyse bestimmt.

Den Herren X. Kong und B. Tezkan danke ich für das überlassene Registriermaterial, Herrn A. Junge für die noch nicht veröffentlichten Sq-Analysenergebnisse.

Literatur:

SCHMUCKER, U.: Auswertungsverfahren Göttingen, Protokoll Kolloquium "Erdmagnetische Tiefenforschung", Neustadt 1978, 163-188.

JUNGE, A.: 150 Tage Langzeitregistrierung bei Göttingen und Augsburg. Protokoll "Erdmagnetische Tiefenforschung", Neustadt 1982, 61-72.

Anhang

T (s)	Z_{xx}			Z_{yy}		
	Re(C) (km)	-Im(C) (km)	ΔC (km)	Re(C) (km)	-Im(C) (km)	ΔC (km)
9,4	-1,06	-0,794	0,150	0,240	2,03	0,079
12,5	-1,16	-0,241	0,117	0,820	2,69	0,102
18,8	-2,04	-0,262	0,162	0,912	3,51	0,155
25,0	-2,50	0,306	0,208	1,52	4,30	0,30
37,5	-2,52	1,50	0,37	2,10	6,36	0,45
50,0	-2,20	1,62	0,82	2,96	7,83	0,46
75,0	-2,52	3,83	0,70	4,41	10,2	0,44
100	-1,36	6,00	1,34	6,05	12,8	0,82
150	4,07	8,30	4,67	8,00	16,0	1,60
200	0,60	8,17	3,21	9,56	18,3	1,48
300	2,83	9,19	5,13	11,2	22,6	2,2
600	0,64	15,1	1,17	15,0	36,1	0,5
900	-1,75	22,7	1,91	20,5	50,9	0,7
1200	4,39	33,0	2,75	24,0	63,8	0,9
1800	5,81	48,1	4,70	36,7	90,6	1,5
2400	16,4	61,2	6,8	50,9	114	3,6
3600	38,5	70,3	12,9	74,3	142	5,3
4800	49,6	92,3	16,7	103	172	7
7200	102	127	29	177	213	19
9600	119	71,3	56,1	210	234	24
14400	59,1	48,4	87,8	260	224	48
11520	98,8	110	71,0	143	303	52
13292	97,5	117	74,7	173	402	56
15709	80,5	167	65,3	241	210	53
19200	124	174	85	325	207	53
24686	167	142	83	389	142	68
34560	171	93	131	431	135	104
57600	221	94	228	543	162	225

Tabelle 4: Komplexe Eindringtiefe C für die Hauptdiagonalelemente der Impedanz. Periodenintervalle wie in Tabelle 3.