

H. Rodemann & P. Worzyk (NlfB-GGA, Hannover)

Einige Fehlerquellen bei der Schlumberger-Geoelektrik

Inhaltsverzeichnis

- 1 Vorbemerkung**
- 2 Elektroden-Sonden-Kombination über einem Halbraum**
- 3 Schlumberger-Anordnung**
- 4 Geometrische Fehlerquellen**
 - 4.1 Eintrage- und Ablesegenauigkeit
 - 4.2 "Dejustier"-Fehlerquellen
 - 4.2.1 Eingegrabene Elektroden/Sonden (Rechenbeispiel)
 - 4.2.2 Einfluß des endlichen Sondenradius
 - 4.3 Zusammenstellung von geometrischen Fehlerquellen
- 5 Umpolen**
 - 5.1 Signalverdopplung und Unterdrückung von Fremdspannungen
 - 5.2 Einschwingzeit
 - 5.3 Umschaltung und Differenzenbildung als digitaler Hochpaß
- 6 Äste**
- 7 Spannungs-, strom- und speicherbezogene Fehlerquellen**
- 8 Überblick über wesentliche Fehlerquellen**
- 9 Literatur**

1 Vorbemerkung

Die Themen 'Ermittlung statistischer Fehler', 'Stör- zu Signalverhältnis' und 'Mehrschichtfall, dünne Schichten' werden in diesem Beitrag aus Platzgründen nur kurz erwähnt, vgl. dazu (RODEMANN & WORZYK 1996).

2 Elektroden-Sonden-Kombination über einem Halbraum

Das Potential am Ort der Sonde M über einem Halbraum mit einer Elektrode A besitzt die Form

$$V = \frac{I * \rho}{2 * \pi * r}$$

mit

$r = \overline{AM} = \sqrt{(x_a - x_m)^2 + (y_a - y_m)^2}$ = Distanz zwischen A und M, wobei

$A = (x_a, y_a)$ = Position der Elektrode,

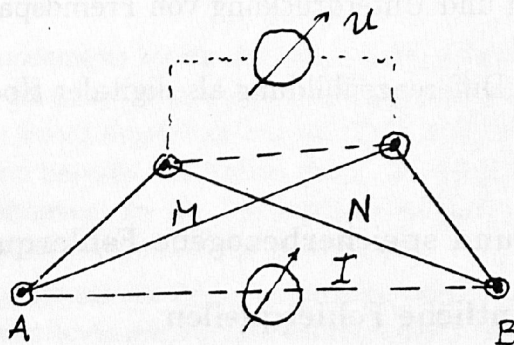
$M = (x_m, y_m)$ = Position der Sonde,

I = Stromstärke in A.

V = Potential in M, und

ρ = spez. Widerstand des Halbraums ist (MUNDRY 1985).

Bei einer Vierpol-Anordnung mit den Elektroden A,B und den Sonden M,N



ergibt sich die Potentialdifferenz ΔV bzw. Spannung U:

$U = I * \rho / K$ mit

$$K = 2 * \pi / (1/\overline{AM} - 1/\overline{AN} - 1/\overline{BM} + 1/\overline{BN})$$

als Geometriefaktor (MUNDRY 1985). Diese Beziehung läßt sich nach ρ auflösen.

Es resultiert die Formel für den scheinbaren Widerstand (Halbraumwiderstand):

$\rho_s = K * U / I$. U / I ist dabei eine Impedanz.

3 Schlumberger-Anordnung

Häufig werden Anordnungen verwendet, bei denen A,B,M und N auf einer Linie liegen (kollinear sind).

Spezialfall: Symmetrische Anordnungen, bei denen der Mittelpunkt von \overline{AB} mit dem Mittelpunkt von \overline{MN} übereinstimmt und

$$\overline{AB} > \overline{MN}.$$

Die Schlumberger-Anordnung bzw. -Auslage ist eine spezielle kollineare symmetrische Anordnung, bei der mit

$$L = \overline{AB} \text{ und}$$

$$a = \overline{MN} \text{ gilt:}$$

$$a \ll L$$

Für die symmetrischen Anordnungen mit $\overline{AB} > \overline{MN}$ ergibt sich der Geometriefaktor K zu

$$K = \pi/a * ((L/2)^2 - (a/2)^2) = \pi/4 * (L^2/a - a)$$

Im folgenden werden hauptsächlich geometrische, spannungs- und strombezogene Fehlerquellen bei Schlumberger-Messungen betrachtet. Dabei kann zwischen systematischen und statistischen Fehlern unterschieden werden.

4 Geometrische Fehlerquellen

4.1 Eintrage- und Ablesegenauigkeit

Das theoretische Auflösungsvermögen des Auges entspricht dem Sehzellenabstand in der Sehgrube: ca. $2,5 \mu\text{m}$ (AHLHEIM 1977).

Zum Vergleich: Die Wellenlänge von rotem Licht beträgt $0,8 \mu\text{m}$. Damit können zwei Punkte unterschieden werden, die mindestens 50 Bogensekunden auseinanderliegen.

Dem entspricht bei einer angenommenen Leseentfernung von 30 cm ein Auflösungsvermögen von 0,07 mm. Ein weiterer Vergleich: Viele Drucker haben eine Auflösung von 300 dpi (dots per inch) entsprechend 0,08 mm.

Allerdings müßte ein entsprechend dünner Bleistift verwendet werden, der vorher abbrechen würde. Es würde ein geringer Helligkeitskontrast entstehen, bei dem viele Ablesungen, z.B. während einer graphischen Auswertung, zu anstrengend würden. Im folgenden wird deshalb von einem ca. 5 mal geringeren Auflösungsvermögen von 0,4 mm ausgegangen. Dies ergibt

- bei der Ablesung einer TK25-Karte mit 4 cm pro km eine Auflösung von 10 m.
- bei der Ablesung eines doppeltlogarithmischen Meßblatts mit einem Modul von 83,3 mm/Dekade eine Auflösung von 1% in ρ_s (s.u.).
- bei der Ablesung eines Analogvoltmeters mit einer 2*5 cm-Skala eine relative Ablesegenauigkeit von $0,4/50=0,8\%$ bei Vollausschlag und von $0,4/(50/3)=2,4\%$ bei 1/3 Vollausschlag.

Beispiel für die Festlegung und Messung der Elektroden-Distanz

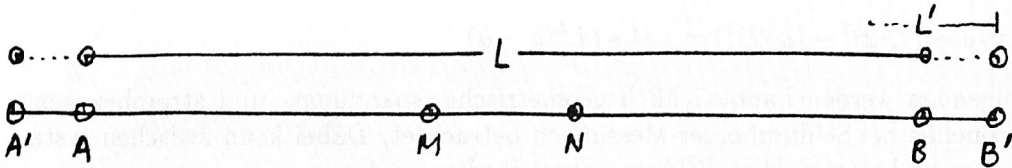
Min. L/2(m)	Max. L/2(m)	Methode	abs. Fehler ca.	rel. Fehler ca.
1,5	300	Meßleine mit Markierungen	$\geq 0,5\text{cm}$	$\geq 0,3\%$
300	1000	Rollenzähler		1%
1000	5000	Identifizierung des Orts in der Karte	$\geq 10\text{m}$	1% - 0,2%

4.2 "Dejustier"-Fehlerquellen

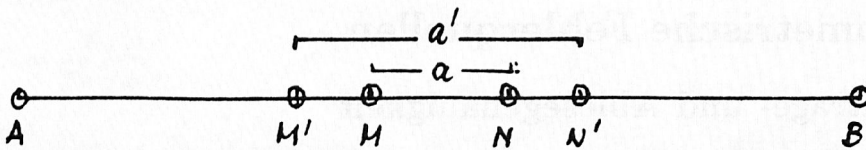
(Auswirkung auf den Geometriefaktor K und damit auf ρ_s)

Es werden typische Abweichungen der tatsächlichen Meßgeometrie von der (idealierten) Schlumberger-Geometrie betrachtet. Dabei werden im folgenden nur Halb-raumrechnungen diskutiert.

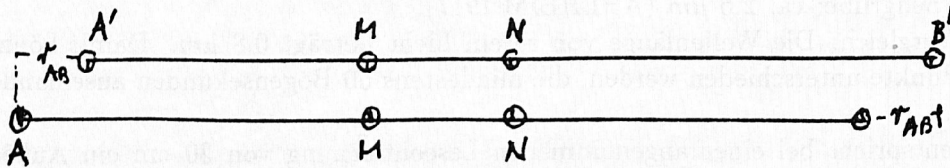
1. Variation des Elektrodenabstands L



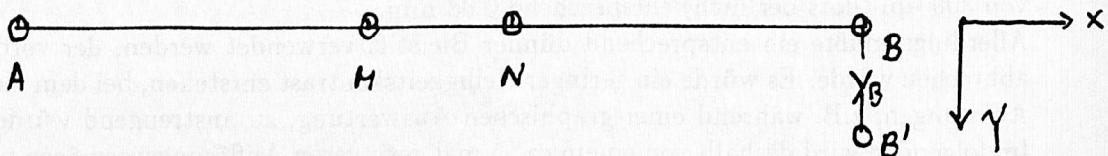
2. Variation des Sondenabstands a



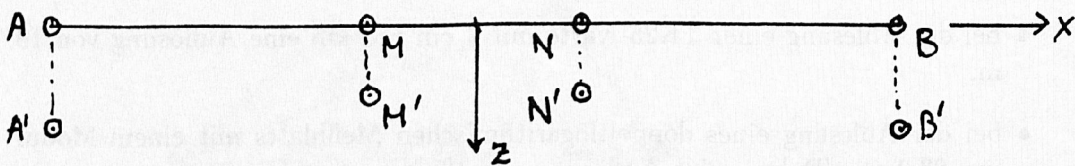
3. Asymmetrische parallele Verschiebung von \overline{AB} relativ zu \overline{MN}



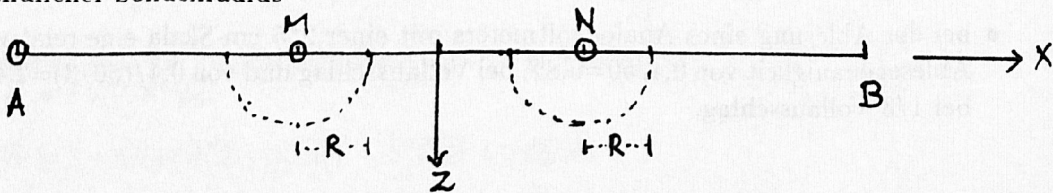
4. Verschiebung der Elektrode B senkrecht zur Auslagerichtung. (in y-Richtung).



5. Elektroden u. Sonden unter der Oberfläche. Rechnung als Beispiel s. u.:



6. Endlicher Sondenradius



4.2.1 Eingegrabene Elektroden/Sonden (Rechenbeispiel)

Zur Berechnung des Effekts von Elektroden u. Sonden unter der Oberfläche:

Bei einer durchschnittlich in der Tiefe t_e unter der Oberfläche eines Halbraums eingegrabenen Elektrode und einer in der Tiefe t_s eingegrabenen Sonde ergibt sich

ein Potential

$$V = \frac{I \cdot \rho}{4 \cdot \pi} * \left(\frac{1}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (t_s - t_e)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x_e - x_s)^2 + (t_s + t_e)^2}} \right)$$

statt

$$V = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} * \frac{1}{|x_e - x_s|}$$

Deshalb hat der Geometriefaktor K_t eine andere Form als der Standardausdruck K .

Mit $K_t = 2 \cdot \pi / N_t$ folgt:

$$N_t = \frac{1}{\sqrt{(L/2 - a/2)^2 + (t_s - t_e)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(L/2 - a/2)^2 + (t_s + t_e)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L/2 + a/2)^2 + (t_s - t_e)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L/2 + a/2)^2 + (t_s + t_e)^2}}$$

Dieser Term wird so umgeformt, daß t_s und t_e als Störung erscheinen. Mit der Näherung $(1 + \epsilon)^{-1/2} = 1 - 1/2 \cdot \epsilon + O(\epsilon^2)$ und

$\Delta K/K = (K_t - K)/K = -\Delta N/N_t + O((\Delta N/N)^2)$ erhält man

$$\Delta K/K = -2 \cdot (t_s^2 + t_e^2) \cdot (3 \cdot L^2 + a^2) / (L^2 - a^2)^2.$$

In quadratischer Näherung für a/L folgt:

$$\Delta K/K = -6 \cdot (t_s^2 + t_e^2) / L^2 \cdot (1 + 7/3 \cdot a^2 / L^2).$$

Für kleines a/L ergibt sich als Vereinfachung mit $t_s^2 = t_e^2 = t^2$

$$\Delta K/K = -12 \cdot t^2 / L^2$$

Numerisches Beispiel:

$$L/2 = 1,5 \text{ m}$$

$$a/2 = 0,5 \text{ m}$$

$$t_s = t_e = t$$

t(m)	t/(L/2)%	$\Delta K/K$ in % numerisch	$\Delta K/K$, vereinfachte Formel
0,05	3,3	-0,4	-0,3
0,07	4,7	-0,8	-0,7
0,10	6,7	-1,7	-1,3

4.2.2 Einfluß des endlichen Sondenradius

Wir betrachten zwei Sonden in Halbkugelform mit dem Radius R und dem Abstand a . Bezüglich eines globalen kartesischen Koordinatensystems sollen sich die Sonden direkt unter der Halbraumgrenze $z=0$ in $x_m=-a/2$ und $x_n=a/2$ befinden, weiterhin in $y=0$. Das von den Elektroden erzeugte elektrische Feld soll nur eine x -Komponente E_{x0} besitzen und näherungsweise homogen sein. Es wird nur die Sonde in $x_n=a/2$

betrachtet, die Wirkung der zweiten Sonde ergibt sich aus Symmetriegründen. Zunächst wird E_{x0} in ein Kugelkoordinatensystem mit dem Mittelpunkt in $x_n = a/2$ umgerechnet:

$$E_{r0} = E_{x0} * \sin\theta * \cos\psi$$

$$E_{\psi0} = -E_{x0} * \sin\psi$$

$$E_{\theta0} = E_{x0} * \cos\theta * \cos\psi$$

Mit dem Ansatz (MOON & SPENCER 1971, p. 26), vgl. auch (SCHULZ 1979)

$$\phi = a * r * \sin\theta * \cos\psi \text{ für } r \leq R \text{ und}$$

$$\phi = b/r^2 * \sin\theta * \cos\psi \text{ für } r \geq R$$

für das Potential (eine Lösung der Laplacegleichung) und

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \text{grad}\phi \text{ folgt}$$

$$E_r = E_{r0} + \partial\phi/\partial r$$

$$E_\psi = E_{\psi0} + 1/r/\sin\theta * \partial\phi/\partial\psi.$$

$$E_\theta = E_{\theta0} + 1/r * \partial\phi/\partial\theta$$

Weitere Details sind in (RODEMANN & WORZYK 1996) zu finden. Die Stetigkeit von $\sigma * E_r$, E_ψ und E_θ bei $r=R$ führt zu

$$\sigma_i * (E_{x0} + a) = \sigma_a * (E_{x0} - 2 * b/R^3) \text{ und}$$

$$a = b/R^3 \text{ mit}$$

$$a = K_\sigma * E_{x0} \text{ mit } b = a * R^3 \text{ mit dem "Reflexionsfaktor"}$$

$$K_\sigma = (\sigma_a - \sigma_i)/(\sigma_i + 2 * \sigma_a)$$

Die Berechnung von E_x mit

$$E_x = E_r * \sin\theta * \cos\psi - E_\psi * \sin\psi + E_\theta * \cos\psi * \cos\theta$$

ergibt innerhalb der Kugel den konstanten Wert $E_x = E_{x0} * (1 + K_\sigma)$ und außerhalb der Kugel den Ausdruck

$$E_x = E_{x0} * (1 + K_\sigma * R^3/r^3) - E_{x0} * 3 * K_\sigma * R^3/r^3 * (\sin\theta)^2 * (\cos\psi)^2.$$

Auf der x-Achse folgt außerhalb der Kugel mit $\theta = 90$ Grad und $\psi = 0$ Grad (positive lokale x-Achse) oder $\psi = 180$ Grad (negative lokale x-Achse)

$$E_x(x) = E_{x0} * (1 - 2 * K * R^3 / |x^3|).$$

Für den Spezialfall $\sigma_i \gg \sigma_a$ folgt aus $K_\sigma = (\sigma_a - \sigma_i)/(\sigma_i + 2 * \sigma_a)$ näherungsweise

$$K_\sigma = -1. \text{ Im Inneren der Kugel ergibt sich}$$

$$E_x = 0.$$

also ein konstantes Potential.

Außerhalb der Kugel, auf der x-Achse (Kugel als Ursprung), folgt:

$$E_x(x) = E_{x0} * (1 + 2 * R^3 / |x^3|).$$

Über die Distanz $a/2$ fällt bei vernachlässigbarem Halbkugelradius die Spannung $U = E_{x0} * a/2$ ab.

Aufgrund der Halbkugel ergibt sich für lokales (negatives) x

$$U_{HK} = E_{x0} * \int_{-a/2}^{-R} (1 - 2 * R^3/x^3) * dx \text{ oder}$$

$$U_{HK} = E_{x0} * (x + R^3/x^2) \Big|_{-a/2}^{-R}$$

$$U_{HK} = E_{x0} * (a/2 - R^3/(a/2)^2)$$

Der absolute Fehler hat die Form:

$$U_{HK} - U = E_{x0} * R^3 / (a/2)^2$$

Er ergibt sich mit beiden Halbkugeln aus Symmetriegründen zu:

$$2 * U_R - 2 * U = -E_{x0} * 2 * R^3 / (a/2)^2$$

Der relative Fehler beträgt schließlich:

$$\Delta U / U = (2 * U_R - 2 * U) / 2 * U = -R^3 / (a/2)^3$$

Numerische Beispiele:

a/2 (m)	R (m)	R/(a/2) in %	$\Delta U / U$ in %
0,50	0,05	10	0,1
0,25	0,03	12	0,15
0,25	0,05	20	0,8

Der Fehler ist also für $a/2 \geq 0,5m$ vernachlässigbar, aber nicht für die gelegentlich verwendeten kleineren a/2-Werte.

4.3 Zusammenstellung von geometrischen Fehlerquellen

Auswirkung auf den Geometriefaktor K, für kleines a/L

1%-Grenze= Wert für $\Delta L / L$ usw. mit $\Delta K / K = 1\%$

Ursache	$\Delta K / K$	Typ. Größe (z.B. $\Delta L / L$) (in %)	Effekt ($\Delta K / K$) (in %)	1%- Grenze (in %)	Bemerkung
Variation von L	$2 * \Delta L / L$	1	2	0,5	Unabhängig
Variation von a	$-\Delta a / a$	1	-1	1	Fest pro Ast
Asymmetrische Versch. r_{AB} a. d. x-Achse	$-12 * (r_{AB} / L)^2$	2	-0,5	3	Nur f. große L-Werte Stets negativ
Änderung y_B einer y-Koordinate	$-3 * (y_B / L)^2$	1	-0,03	6	Nur für große L-Werte Stets negativ
Elektr./Sond. unter d. Oberfl.	$-12 * (t / L)^2$	2,5	-0,8	3	Nur für sehr kleine L-Werte Stets negativ
Endlicher Sond- denradius R	$\Delta U / U =$ $-8 * (R / a)^3$	10	$\Delta U / U$ -0,8	$\Delta U / U$ 11	Nur für bes. kleine a-Werte $a < 1m$ Stets negativ

5 Umpolen

5.1 Signalverdopplung und Unterdrückung von Fremdspannungen

Sei U_0 ein Stör-Gleichspannungsanteil
und

U_{st} eine statistische oder periodische Störspannung. Sei R gesucht. Gemessen wird
 $U_{mess} = U + U_0 + U_{st}$ mit $U = I_{gen} * R$, kurz $U = I * R$.

Eliminieren von U_0 durch Kombination zweier Messungen mit unterschiedlichen
Strömen ergibt:

$$U_{mess1} = I_1 * R + U_0 + U_{st1}$$

$$U_{mess2} = I_2 * R + U_0 + U_{st2}$$

Es folgt:

$$R = (U_{mess1} - U_{mess2}) / (I_1 - I_2) - (U_{st1} - U_{st2}) / (I_1 - I_2)$$

Der U_{st} -Störterm wird im Ausdruck für R um so kleiner, je größer $I_1 - I_2$ ist. Der
Vorteil des Umpolens gegenüber der Ein-Null-Meßfolge ist offensichtlich:

Für den Umpol-Fall folgt:

$$R = (U_{mess1} - U_{mess2}) / (2 * I) - (U_{st1} - U_{st2}) / (2 * I)$$

Jetzt soll eine zusätzliche konstante Drift berücksichtigt werden.

Ansatz:

$$U_{mess} = I_{gen} * R + U_0 + U_{st} + U_1 * t$$

Gesucht ist wieder R .

U_0 und U_1 sollen eliminiert werden. Wie im vorigen Abschnitt führt das Eliminieren
von U_0 zu

$$U_{mess1} = I_1 * R + U_0 + U_{st} + U_1 * t_1$$

$$U_{mess2} = I_2 * R + U_0 + U_{st} + U_1 * t_2$$

$$R = (U_{mess1} - U_{mess2}) / (I_2 - I_1) + 2 * U_{st} + (U_1 * (t_2 - t_1)) / (I_2 - I_1).$$

Hier muß also zur Unterdrückung der Drift dafür gesorgt werden, daß $(t_2 - t_1) / (I_2 - I_1)$
möglichst klein wird.

Eine wirkliche Eliminierung einer Drift kann durch zweifaches Umpolen erreicht
werden:

$$U_{mess1} = I_1 * R + U_0 + U_1 * t_1$$

$$U_{mess2} = I_2 * R + U_0 + U_1 * t_2$$

$$U_{mess3} = I_3 * R + U_0 + U_1 * t_3$$

Als Lösung ergibt sich für frei wählbare Zeiten

$$R = \frac{U_{mess1} * (t_3 - t_2) - U_{mess2} * (t_3 - t_2) + U_{mess3} * (t_2 - t_1)}{I_1 * (t_3 - t_2) - I_2 * (t_3 - t_2) + I_3 * (t_2 - t_1)}$$

und für gleiche Zeitintervalle Δt gilt

$$R = \frac{U_{mess1} - 2 * U_{mess2} + U_{mess3}}{I_1 - 2 * I_2 + I_3}.$$

Eine Eliminierung höherer Terme ist möglich.

5.2 Einschwingzeit

Wir betrachten einen rechteckigen Wechselstrom der Periodendauer T mit der Einschwingzeit t (nach jeder Umpolung), hervorgerufen durch induktive Prozesse. Nach MUNDREY (1967) wird die Plateauphase (konstante Spannung U) nach einer Einschwingzeit t erreicht, die vom spezifischen Widerstand ρ , von der Auslagenlänge $L/2$ und der gewünschten Genauigkeit (in % von ρ_s) abhängt:

$$t_{10\%} = 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot (L/2)^2 / \rho$$

$$t_{1\%} = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot (L/2)^2 / \rho.$$

Mit $L/2=5000$ m ergibt sich folgende Tabelle:

$\rho(\Omega \cdot m)$	$t_{10\%}$	$t_{1\%}$
1	29	138
10	3	14
100	0,3	1,4
1000	0,03	0,14

Die Zeiten sind z.B. für $L/2=1000$ m 25mal kleiner. Die Einschwingzeit kann durch die Induktivitäten von Kabeltrommeln erhöht werden (SÜDEKUM, pers. Mitt.). Die berechneten Zeiten beziehen sich auf Halbraumrechnungen. Ein geschichteter Untergrund und andere Leitfähigkeits-Inhomogenitäten können den Einstellvorgang wesentlich beeinflussen (MUNDREY 1967). Eine Abschätzung der Einschwingzeit vor der eigentlichen Messung ist deshalb vorzunehmen.

5.3 Umschaltung und Differenzenbildung als digitaler Hochpaß

Das Einschalten und spätere Umpolen des Generators wird betrachtet.

Sei ein sinusförmiges Störsignal der Frequenz f entsprechend einer Periode T und mit der Amplitude A und Phase t_0 vorhanden.

Zwei Meß-Zeiten t_1 und t_2 seien gegeben.

Zeitunterschied $\Delta t = t_2 - t_1$. Dann resultieren die Meßwerte:

$$U_1 = A \cdot \sin(2 \cdot \pi / T \cdot (t_1 - t_0))$$

$$U_2 = A \cdot \sin(2 \cdot \pi / T \cdot (t_2 - t_0)).$$

Nach der AD-Wandlung und Übernahme in den Rechner

werden die Werte voneinander abgezogen. Dann ergibt sich mit

$$\sin(\alpha) - \sin(\beta) = 2 \cdot \cos((\alpha + \beta)/2) \cdot \sin((\alpha - \beta)/2)$$

für die halbe Differenz:

$$\Delta U = (U_1 - U_2)/2 = -A \cdot \cos(\pi/T \cdot (\Delta t + 2 \cdot (t_1 - t_0))) \cdot \sin(\pi/T \cdot \Delta t).$$

Der phasenunabhängige Teil beschreibt einen einpoligen Hochpaß, weil für $\pi/T \cdot \Delta t \ll 1$ näherungsweise gilt:

$$\sin(\pi/T * \Delta t) = \pi/T * \Delta t.$$

z. B gilt für $\Delta t = 5 \text{ sec.}$

Periode(sek.)	Frequenz(Hz)	$\Delta U/A$
100	0,010	0,157
300	0,003	0,052
1000	0,001	0,016
Gleichsp.	0	0

6 Äste

Bei einer Schlumberger-Auslage mit $a \ll L$ ergibt sich für den Spannungsgewinn U bei konstanter Stromstärke I der Ausdruck:

$$U = I * \rho / K = \frac{I * \rho * a}{\pi * ((L/2)^2 - (a/2)^2)}$$

Bei einer Sondenentfernung $a \ll L$ folgt näherungsweise:

$$U = \frac{4 * I * \rho * a}{\pi * L^2}$$

d. h., U vermindert sich mit dem Quadrat des wachsenden Elektrodenabstands L . Spätestens wenn U nicht mehr genau genug meßbar ist, muß deshalb der Sondenabstand a vergrößert werden (Sondensprung). Es wird dabei ein neuer, überlappender Kurvenast begonnen (späterer Astausgleich, falls keine Vierpol-Filter benutzt werden). Die einzelnen Äste haben in der Regel einen Versatz gegeneinander, der z. B. vom unterschiedlichen a/L -Verhältnis und von lateralen Unterschieden im spez. Widerstand herrühren. Um die Sonden nicht zu oft versetzen zu müssen, ist es dann wünschenswert, das neue a möglichst groß zu wählen. Hierbei muß ein Kompromiß mit der Schlumberger-Bedingung $a \ll L$ erzielt werden. Bei der Auswertung als Schlumberger-Kurve sollte zunächst eine sog. MN-Korrektur (MUNDRY 1980) durchgeführt werden. Andernfalls können erhebliche Auswertefehler resultieren (z.B. 30%). Diese Korrektur ist allerdings selbst eine Näherung. Bei der erforderlichen Berechnung der Steigung

$$\gamma = \partial \log(\rho_s) / \partial \log(L/2)$$

können Fehler auftreten, wenn finite Differenzen verwendet werden. Am besten erscheint es, die Daten mit einem Vierpol-Filter (O'NEILL et al. 1984) auszuwerten. Dabei können sowohl Abweichungen von der Schlumberger-Bedingung wie z.B. auch Abweichungen von der Symmetrie oder der Kollinearität berücksichtigt werden. Eine MN-Korrektur erübrigt sich dann. Der Filter eignet sich auch für die Auswertung von Vielelektroden-Messungen. Die Auswertung verbraucht allerdings mehr Rechenzeit.

7 Spannungs-, strom- und speicherbezogene Fehlerquellen

Ursache/Typ	Bemerkungen	geschätzter Effekt/Korrektur
Strom		
R_{shunt} (Strom)	Eichfehler Temperatur-Abhängigkeit	wirkt auf die ganze Sondierung gleichmäßig
Spannungen		
U_{shunt} u. U pro Stufe	Eichung der Verstärker	
AD-Wandler	Eichfehler wirkt gleichmäßig (s.o.)	Diese Effekte können, speziell nach Eichung und entspr. Korrekturen, auf ca. 1% reduziert werden.
AD-Wandler	Wandlungsfehler	bei 12 bit u. 1/3 Ausst. 0,1%
Analogvoltmeter	Anzeigefehler Ablesefehler 1/3 Voll.	typisch 1% typisch 2 %
Statistische Fehler	Tellurik, künstliche Störungen, begrenzte Auflösung des Voltmeters (ca. 1 μ Volt)	durchschn. 0,3% für kleines L 4% für großes L, max. 20%
16 2/3 Hz, 50 Hz	Dämpfung durch Tiefpässe u. ggf. Notches	Dämpfung langperiod. Signale durch dig. Hochpaß, Stapeln
Stör-Gleichspannung	Geochem. Effekte	Eliminierung durch Umpolen
Drift	z. B. durch $Cu - CuSO_4$ -Sonden	Dämpfung/Eliminierung durch Umpolen
IP-Effekt		ca. 0,1 bis 1% b. 1.5 sek. (GRISSEMANN, BGR, pers. Mitt.)
HF	AD-Wandler-Karte im PC	Abschirmung
Speicherung		bei richtiger
Digitale Speicherung		Formatierung: -
"Analoge Speicherung"	Eintragung in ein Meßblatt	1%
Sonstiges		
Erdung	Asymmetrie-Effekte	z. B. durch symmetrische Auslegung des Netzteils behebbar (LEIBOLD & INSINGER, BGR, pers. Mitteilung).
Einschwingzeit t	$\Delta U/U = f(t, \rho, L)$	z.T. 1%

8 Überblick über wesentliche Fehlerquellen

Ursache/Typ	Bemerkungen	geschätzter durchschn. Effekt
Geometrie	Kleines L	1%
ohne Δa	Großes L	2%
Geometrie, Δa		1%, fest pro Ast
Spannung/Strom		1%
Statistischer Fehler	Kleines L	0,3%
	Großes L	4,0%
Einschwingzeit	Kleines L	0%
	Großes L	1%
IP-Effekt		0,5%
Summe d. Beträge	Kleines L	4%
	Großes L	10%
$\sqrt{\sum(\text{Effekte})^2}$	Kleines L	2%
	Großes L	5%

Die statistischen Fehler können zusammen mit den Meßwerten gespeichert und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Damit verbleiben für die "nicht-statistischen" Fehler:

Ursache/Typ	Bemerkungen	geschätzter durchschn. Effekt
Summe d. Beträge	Kleines L	3,5%
	Großes L	6%
$\sqrt{\sum(\text{Effekte})^2}$	Kleines L	2%
	Großes L	3%

Bei Verwendung von Vierpol-Filtern kann ein Teil der geometrischen Effekte, z. B. eine asymmetrische Verschiebung bei Längsauslagen, bei der Auswertung berücksichtigt werden (bis auf einen Rest von ca. 10 m).

Effekte, die auf die gesamte Sondierung oder astweise wirken, sollten bei der Berechnung von Parameter-Fehlern separat betrachtet werden, weil sie z.T. nur eine Verschiebung der gesamten ρ_s -Kurve bewirken. (Δa -Effekt, Widerstandseichung usw.)

9 Literatur

- AHLHEIM, K.-H. (Hrsg) (1977): Wie funktioniert das? Der Mensch und seine Krankheiten. - Bibliographisches Institut, Meyers Lexikon Verlag. Mannheim, Wien, Zürich. 2. Aufl.
- MOON, P. & SPENCER, D.E. (1971): Field Theory Handbook. - Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- MUNDRY, E. (1967): Der Einschaltteffekt bei der Gleichstromsondierung.- Unveröffentlichtes Manuskript, Hannover.
- MUNDRY, E. (1980): The effect of a finite distance between potential electrodes on Schlumberger resistivity measurements - A simple correction graph. - Geophysics, 45: 1872-1875.
- MUNDRY, E. (1985): Gleichstromverfahren. in: BENDER, F. (Hrsg), Angewandte Geowissenschaften, Band II, Methoden der angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften: 299-338, Enke Verlag, Stuttgart.
- O'NEILL, D.J. & MERRICK, N.P. (1984): A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array. - Geophysical Prospecting: 32, 105-123.
- RODEMANN, H. & WORZYK, P. (1996): Zu einigen statistischen und systematischen Fehlern der klassischen Gleichstrom- Geoelektrik. - NLFB-Archiv, Bericht Nr. 115 455, Hannover, in Vorbereitung.
- SCHULZ, R. (1979): Potential einer Kugel als geoelektrischer Störkörper im homogenen Halbraum. - NLFB-Archiv, Bericht Nr. 81 821, Hannover.