



EINFÜHRUNG

Die Methode der Spektrale Induzierte Polarisation (SIP) misst die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes von Gesteinen nach Betrag und Phase. In der Frequenzabhängigkeit des Widerstandes spiegelt sich unter anderem die Geometrie des Porenraumes und den darin befindlichen Fluiden wieder. Üblicherweise wird das Widerstandsspektrum mit monofrequenten Signalen sequentiell vermessen. Diese Vorgehensweise erweist sich bei großskaligen Messanordnungen mit hohen Störspannungen als vorteilhaft da die Energie des Messgerätes auf einen schmalen Frequenzbereich konzentriert und eine Unterscheidung von Nutz- und Störfrequenzen erleichtert wird. Bei Labormessungen spielen Störspannungen häufig nur eine untergeordnete Rolle. Wichtiger ist hier ein möglichst hoher Messfortschritt. Am schnellsten ist die sequentielle SIP Messung, wenn für die Messungen jeweils nur Einzelperioden verwendet werden. Bei einer Frequenz pro Oktave, dauert die Gesamtmessung dann idealerweise doppelt so lange wie die längste Periode andauert. Sollen die Impedanz auch bei sehr niedrigen Frequenzen gemessen werden, dann verlängert dies die Messzeit erheblich. Es stellt sich daher die Frage, ob in Fällen mit hohem Signal- zu Rauschverhältnis noch schnellere Messungen möglich sind.

MULTIFREQUENTE SIP ANREGUNG

Die Lösung liegt in der multifrequenten Anregung. Hierzu werden sämtliche Einzelfrequenzen überlagert. Abbildung 1 zeigt exemplarisch ein solches überlagertes Anregungssignal. Da die meisten Gesteine ein lineares elektrisches Übertragungssystem darstellen, ist auch das Empfangssignal multifrequent. Eine Messung mit diesem multifrequenten Signal benötigt nur die halbe Messzeit. Der höhere Messfortschritt geht jedoch einher mit einer verringerten Messgenauigkeit. Ursache hierfür ist, dass die Einzelamplituden soweit verringert werden müssen, dass die Summenamplitude nicht die maximale Ausgangsspannung des Messgerätes überschreitet. Der Crest Faktor quantifiziert diesen Effekt.

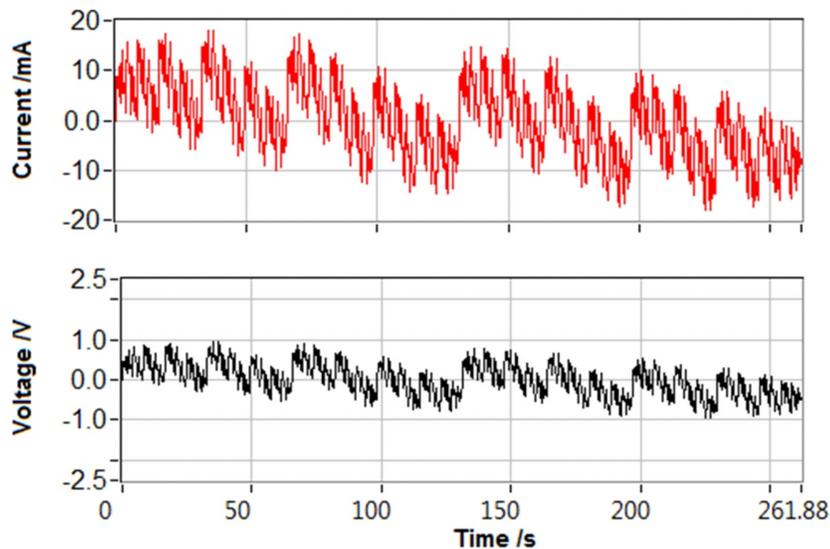


Abb. 1: Multifrequentes SIP-Anregungssignal (oben), darunter das resultierende Spannungssignal. Hierzu wurden sämtliche (24) interessierenden Messfrequenzen überlagert. Alle Frequenzen wiesen die gleiche Amplitude und relative Phasenlage auf. Der besseren Erkennbarkeit wegen wurden die höherfrequenten Anteile nicht dargestellt.

NEUARTIGES LABORMESSGERÄT: SIP-LAB-FAST

Dem Wunsch nach schnelleren SIP Messungen sind wir (Radic Research) mit der Entwicklung eines Multifrequenz-Labormessgerätes nachgekommen. Im Auftrages des LIAG (Hannover) haben wir ein 88+1 kanaliges Messgerät entwickelt, das neben der eingeführten monofrequenten, sequentiellen auch multifrequente Messungen erlaubt. Bei den multifrequenten Messungen können bis zu 24 Frequenzen überlagert werden. Bei beispielsweise einer Frequenz pro Oktave lässt sich so ein Frequenzbereich von über 7 Dekaden mit einer Einzelmessung vermessen. Der nutzbare Frequenzbereich reicht von 100 μ Hz bis 40 kHz.



Abb. 2: SIP-Labor-Messinstrument für sequentielle mono- und schnelle multifrequente Impedanzmessungen. Es ermöglicht die gleichzeitige Impedanzmessung mit 88 4-Punkt Konfigurationen. Der Anregungsstrom kann in 2 von 32 Stromelektroden gespeist werden.

IMPEDANZBERECHNUNG

Um aus den gemessenen Zeitreihen von Strom und Spannung ein Impedanz- bzw. Widerstandsspektrum zu berechnen, werden die Zeitreihen partitioniert und für alle Messfrequenzen Fourier Koeffizienten berechnet. Die hohe Abtastrate (128 kHz), die hohe Messkanalanzahl (88+1), die Länge der Zeitreihen (bis zu Stunden) und die Anzahl an Frequenzen (24) erforderte für diese Aufgabe die Entwicklung und Implementierung einer speziellen Hardware. 2136 Realtime DFT Prozessoren auf FPGA Ebene garantieren eine verzögerungsfreie Fourier Transformation.

Mittels einer Kohärenzanalyse (Methode der kleinsten Quadrate) werden dann aus den Fourier Koeffizienten die Impedanzspektren nach Betrag und Phase, sowie die zugehörigen Vertrauensbereiche (Fehler) berechnet.

MESSUNG AN PYRIT PROBE

Abb.3 zeigt das Ergebnis einer Multifrequenz-Messung an einer Pyrit Probe. Das Ergebnis stimmt so gut mit dem der sequentiellen, monofrequenten Impedanzmessung überein, dass auf eine grafische Wiedergabe verzichtet wurde.

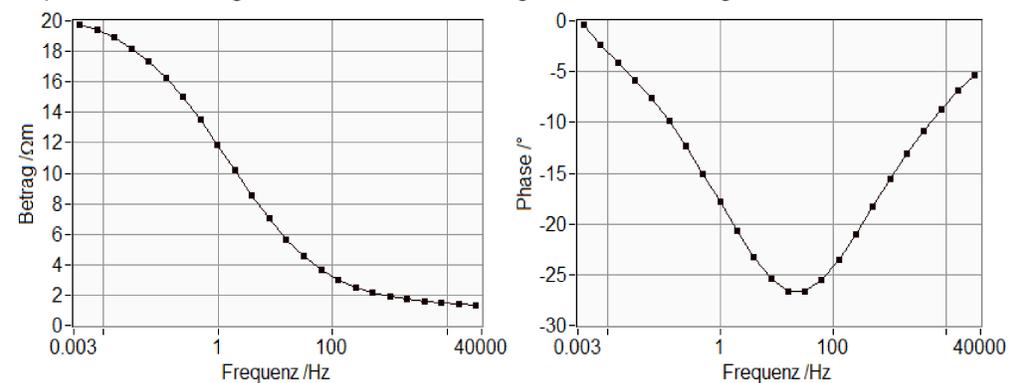


Abb. 3: Multifrequent gemessenes Widerstandsspektrum einer Pyrit Probe. Die Messung wurde mit einem Signal aus 24 überlagerten Frequenzen in einem Schritt gemessen. Die Messdauer betrug 785 s, entsprechend 3 Perioden bei der niedrigsten Frequenz: 0.0038 Hz.

WEITERE ANREGUNGSSIGNALFORMEN

Durch die freie Wahl von Frequenz und Amplitude können durch Überlagerung auch andere Anregungssignalformen erzeugt werden. Wählt man z.B. 24 linear äquidistante Frequenzen mit Amplituden, die umgekehrt proportional mit der Frequenz abnehmen, dann erhält man ein annähernd rechteckförmiges Anregungssignal (Abb. 4, links), das der bei Zeitbereichsmessungen üblichen Signalform nahe kommt. Um auch mit dieser Signalform ein breites Impedanzspektrum zu bestimmen wurde die Messung in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst mit 24 Frequenzen zwischen 0.9 Hz und 45 Hz und dann mit 24 Frequenzen zwischen 45 Hz und 2500 Hz. Das resultierende Impedanzspektrum ist in Abbildung 4 rechts dargestellt. Das Ergebnis stimmt gut mit dem der logarithmisch äquidistanten Messung überein. Der Phasensprung bei 45 Hz könnte von einer Temperaturänderungen zwischen den beiden Messungen herrühren.

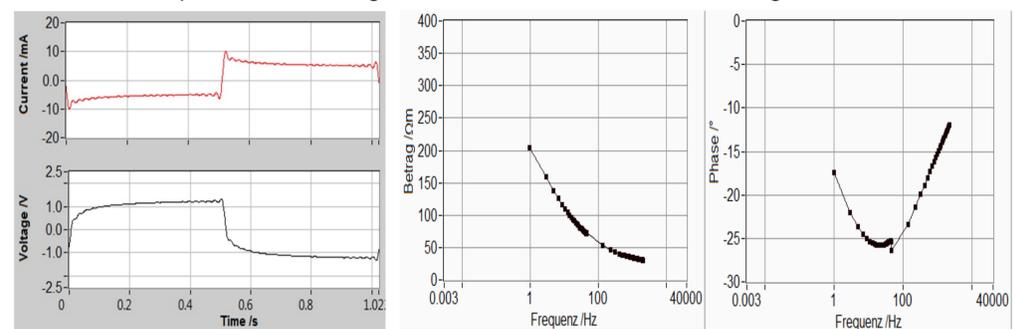


Abb. 4: Bei Verwendung von linear äquidistanten Frequenzen mit abnehmender Amplitude, können auch rechteckförmige Anregungssignale erzeugt werden. Zur Impedanzspektrum Darstellung wurden die Ergebnisse zweier Messungen mit je 24 Frequenzen kombiniert.

FAZIT

Die multifrequente Anregung verdoppelt den Messfortschritt von SIP-Messung. Noch schnellere Messungen sind prinzipiell nicht möglich. Die niedrigste verwendete Frequenz bestimmt einerseits die Dauer der gesamten SIP-Messung, andererseits bestimmt Sie die untere Begrenzung des Impedanzspektrums. Das gilt für alle gewählten Signalformen, sofern eine spektrale Auswertung erfolgt.

Werden hingegen, wie bei Zeitbereichsmessungen üblich, nur die Spannungstransienten ausgewertet, dann ist der Informationsgehalt geringer, weil die Transienten nur halb so lang sind wie die Anregungsperiode. Und das erhöht die niedrigste Frequenz für die die Impedanz bestimmt werden kann. Ein Dirac-Impuls würde zu einem längeren Transienten führen ist aber für SIP-Messungen ungeeignet.

Web link: http://www.radic-research.de/Flyer%20SIP-LAB-FAST_120121.pdf

<https://dgg-online.de/Arbeitskreise/Arbeitskreis-Induzierte-Polarisation/>

<https://www.researchgate.net/project/German-Geophysical-Society-DGG-Working-Group-IP-AK-IP>