



Originally published as:

Grünthal, G. (1974): Cepstraluntersuchungen an ersten Einsätzen teleseismischer Aufzeichnungen von unterirdischen Kernexplosionen. - Gerlands Beiträge zur Geophysik, 83, 2-3, 181-198

Cepstraluntersuchungen an ersten Einsätzen teleseismischer Aufzeichnungen von unterirdischen Kernexplosionen

Von **G. Grünthal**, Leipzig*)
(Mit 10 Abbildungen)

Zusammenfassung

Durch Berechnung des Cepstrums des ersten Einsatzes P einer seismischen Welle; deren Quelle bei unterirdischen Kernexplosionen als näherungsweise punktförmig und sehr kurzzeitig angenommen werden kann, müßte sich die tiefe Phase pP andeuten. Aus der Verzögerungszeit $pP-P$ der tiefen Phase zum ersten Einsatz und einer angenommenen mittleren Geschwindigkeit des von der tiefen Phase zusätzlich durchlaufenen Gesteinspakt zwischen Erdoberfläche und Schußpunkt läßt sich die Schußtiefe ableiten. Amerikanische Versuche, deren Herdtiefe a priori bekannt ist, bieten somit die Möglichkeit, die Aussagekraft und damit die prinzipielle Anwendbarkeit der Methodik der Cepstralanalyse auf seismologisches Meßmaterial zu testen. Tatsächlich lassen sich in den berechneten Cepstren die erwarteten Peaks erkennen, die bei unterirdischen Kernexplosionen des Semipalatinsker Testgebiets sehr deutlich sind und ohne Zweifel der tiefen Phase zugeordnet werden können, deren zeitlicher Einsatz im beobachteten Signal nicht auszumachen ist. Die Untersuchung der ersten Einsätze der im Nevada-Testgebiet und auf den Aleuten gezündeten Tests ergibt ebenfalls die als tiefe Phase gedeuteten Cepstralpeaks, woraus *sich* bei einem plausiblen Geschwindigkeitsansatz die ohnehin bekannten Herdtiefen nachweisen lassen.

Summary

By analysing the cepstrum of the first arrival P of a seismic wave the depth phase pP should be indicated. It is possible to estimate the shot depth at the delay time $pP-P$ of the depth phase pP to the first arrival P and with an accepted medium velocity between the Earth's surface and the shot depth. American events whose shot depths are known a priori thus offer the possibility to test the significance of this cepstral method and, as a consequence, the applicability of the cepstral technique to seismological data material. In fact the expected peaks may be recognized in the calculated cepstra. They are very clean in the case of underground nuclear explosions of the Semipalatinsk test site, and without any doubt they may be attached to the depth phase. It is very difficult to discern the arrival in practical records. The examination of the first arrivals from tests ignited in the Nevada test site and the Aleutian Lest site gives the cepstral peaks, which can also be interpreted as depth phases. Therefore, by accepting a reasonable velocity-to-depth function the already known shot depth can be pointed out. The applicability of this cepstral method to records of natural events must be studied in future.

1. Einführung

In der Seismologie finden unterirdische Tests von Kernexplosionen seit jeher besonderes Interesse. Da ihre Quelle ganz im Gegensatz zu Beben vergleichbarer Intensität als näherungsweise punktförmig angenommen werden kann und die Dauer des Herdprozesses weniger als 10^{-3} s beträgt (BORMANN [4]), eignen sich die durch

*) GOTTFRIED GRÜNTAL, Karl-Marx-Universität Leipzig, Sektion Physik, Fachbereich Geophysik, DDR-701 Leipzig, Talstr. 35

sie entstehenden elastischen Wellen zur Ausbildung spezieller Untersuchungsmethoden. Beispielsweise versuchte COHEN [6] die Verzögerungszeit der tiefen Phase zum ersten Einsatz an drei unterirdischen Kernexplosionen des Nevada-Testgebiets für Aufzeichnungen in Pn -Entfernungen anzugeben. Er verwendete Registrierungen eines Stationsnetzwerkes von 31 Meßpunkten. Seine Untersuchungsergebnisse lassen keine zwingende Interpretation zu. Bei Annahme einer mittleren Geschwindigkeit des von der tiefen Phase zusätzlich durchlaufenen Gesteinspakets zwischen Erdoberfläche und Schußpunkt konnte er aus den ermittelten Verzögerungszeiten die schon bekannten Schoßtiefen mit einem mittleren Fehler von 15% angeben.

Registrierungen der seismologischen Station Collmberg von P -Wellen unterirdischer Kernexplosionen wurden systematisch untersucht. Die Spektren der P -Wellen zeigen typische Interferenzbilder. Obwohl die Ursachen solch einer Interferenz sehr mannigfaltig sein können (Reverberationen in Krustenschichten im Herdgebiet bzw. unter der Registrierstation, multipler Herdvorgang u. dgl.), müßten bei Zerlegung der ersten Einsätze in die in ihnen enthaltenen interferenzerzeugenden Bestandteile zumindest Aussagen über den Einsatz der tiefen Phase möglich sein.

Durch Analyse von Registrierungen amerikanischer unterirdischer Kernwaffentests müßten die als tiefe Phase gedeuteten Interferenzeinsätze bei einem plausiblen Geschwindigkeitsansatz den schon a priori bekannten Schoßtiefen zugeordnet werden können. Gelänge dieser Nachweis, würde die hohe Empfindlichkeit des hier verwendeten Analyseverfahrens unter Beweis gestellt und seine Aussagekraft an praktischen Beispielen getestet. Die somit den ausgewerteten Signalen, die bei Epizentralentfernungen von etwa 81° , 76° bzw. 40° lange Laufwege durch ein stark tiefpaßfilterndes Medium hatten, zu entnehmenden Informationen sind visuell nur bei sehr kurzperiodischen Aufzeichnungen zu gewinnen.

2. Methodik

Die Cepstralanalyse ermöglicht die Erfassung der Einsatzzeiten miteinander interferierender Signale und ist damit ein Hilfsmittel zur kinematischen Interpretation, während sich die Methode selbst auf Verfahren der dynamischen Interpretation gründet.

BOGERT, HEALEY und TUKEY [3], auf die der Begriff des Cepstrums zurückgeht, definierten das Cepstrum eines Signals $z(t)$ als das Spektrum des Logarithmus vom Signalspektrum $Z(\omega)$; das Cepstrum $c(\nu)$ ist dann

$$c(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Log } Z(\omega) e^{-i\omega\nu} d\omega. \quad (1)$$

Die von der tiefen Phase herrührende Interferenz im Spektrum der ersten Schwingungszüge kann folgendermaßen beschrieben werden: $z(t)$ sei das registrierte Zeitsignal, welches sich zusammensetzt aus dem vom seismischen Ereignis gebildeten und direkt am Empfänger eintreffenden Term $y(t)$ und dem um die Zeit τ verzögerten Term $y(t-\tau)$:

$$z(t) = y(t) + ky(t-\tau); \quad -1 \leq k \leq +1. \quad (2)$$

Das Amplitudenspektrum von $z(t)$ ergibt sich zu

$$|Z(\omega)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} z(t) e^{-i\omega t} dt \right|, \quad (3)$$

$$|Z(\omega)| = |Y(\omega)| \left(1 + k^2 + 2k \cos \omega\tau\right)^{1/2}, \quad (4)$$

wobei $Y(\omega)$ das „glatte“ Spektrum des ersten Terms in Gleichung (2) ist, das durch den Tiefpaßcharakter des durchlaufenen Mediums und die Charakteristik des Seismographen geformt wird. Der zweite Term in (4) gibt den Einfluß des um die Zeit z verzögert eintreffenden Signals wieder.

Für Reflexionen an der freien Oberfläche ist k negativ und hat näherungsweise den Betrag 1. Daraus folgt:

$$|Z(\omega)| \approx |Y(\omega)| 2 \left| \sin \frac{\omega\tau}{2} \right|. \quad (5)$$

Aus der im Spektrum eines interferenzbehafteten Signals auftretenden sinusförmigen Überlagerung $|\sin \omega\tau/2|$ des glatten interferenzfreien Spektralanteils $Y(\omega)$ liefert nun das Cepstrum die Zeit τ bzw. deren ganzzahlige Vielfache.

Die Voraussetzung der Methode, daß die einzelnen Einsätze innerhalb eines relativ kurzen Ausschnittes einer Registrierung keine großen Unterschiede in der Spektralzusammensetzung aufweisen, kann als gültig angenommen werden.

Laut Definition werden bei Berechnung des Cepstrum vor der Transformation beide Terme in Gleichung (4) durch Einführung des Logarithmus in additive Beziehung gebracht. Der den Interferenzanteil beschreibende Term wird durch Verwendung des Logarithmus zum Term, der nur vom Signalspektrum abhängt, addiert, während in (4) beide Spektralanteile multiplikativ verknüpft sind. Logarithmierte man die beiden Terme in (4) nicht, dann stellte das Cepstrum des registrierten Zeitsignals die Faltung der Transformierten beider Terme dar. In den laut Definition durch Transformation der vorher logarithmierten Transformierten berechneten Cepstren ist die Abszisse wieder wie im Ausgangssignal eine Zeitskala. Jede Abtastung im Zeitsignal ergibt im Cepstrum auf der Abszisse einen zugehörigen Cepstralwert.

Dabei bilden sich die beiden Transformierten in unterschiedlichen Bereichen auf der Abszisse ab. Das Cepstrum des Wavelet-Anteils $Y(\omega)$ ist eine sehr stark gedämpfte Funktion, die nur in der Umgebung des Ursprungs wesentlich von Null verschieden ist. Dagegen ist das Cepstrum der Interferenzanteile eine für die Verzögerungszeiten der Interferenzeinsätze charakteristische, über den ganzen Cepstralbereich ausgedehnte Impulsfolge. Nachdem mit der Cepstralanalyse in einer für erkundungsseismische Probleme modifizierten Variante theoretische und praktische Erfahrungen gewonnen werden konnten (AURASS [1], GRÄSSL u. AURASS [7]), wurde versucht, dieses Verfahren zur Untersuchung der interferenzerzeugenden Einsätze in den Kernexplosionsregistrierungen anzuwenden.

Im Unterschied zu der von COHEN [6] beschriebenen Methodik wurden die hier ausgewerteten Cepstren nicht über das Leistungsspektrum, sondern aus dem Amplitudenspektrum (Periodogramm) berechnet. Die im Cepstrum auftretenden Peaks

bieten somit bei relativ einfachen Interferenzstrukturen nicht nur die Möglichkeit, den zeitlichen Einsatz von im Signal enthaltenen Interferenzen anzugeben, sondern lassen auch deren Vorzeichen erkennen. Dies hat gerade für die Identifizierung der tiefen Phase Bedeutung, die, durch Reflexion an der Erdoberfläche entstanden, gegenüber dem mit positivem Vorzeichen behafteten direkten, ersten Signal in den Cepstren als Peak negativen Vorzeichens auftritt.

Des weiteren umfassen die hier behandelten Cepstren nicht nur den als Wavelet-Anteil des Cepstrums bezeichneten Teil, sondern bieten auch die Möglichkeit, die noch nach einer Sekunde nach der ersten Bodenbewegung auftretenden Einsatzzeiten von Interferenzen auszuwerten. Jedoch muß bemerkt werden, daß neben den reellen Einsätzen im Cepstrum auch deren Linearkombinationen möglich sind, die die Interpretation späterer Einsätze erschweren können.

Lassen sich aus den berechneten Cepstren Peaks ableiten, die als tiefe Phase gedeutet werden könnten, so wäre damit einerseits bei Annahme einer mittleren Geschwindigkeit zwischen dem Schußpunkt und der reflektierenden Erdoberfläche die Möglichkeit gegeben, die Schußtiefe abzuleiten, und zum anderen kann bei bekannter Schußtiefe eine mittlere Geschwindigkeit der obersten Krustenschichten im Schußgebiet angegeben werden.

Zur Berechnung der Schußtiefe wurde die Methode von BERLAGE [2] angewendet, die darin besteht, daß die Zeitdifferenz der Einsätze pP und P im Punkt C bestimmt wird, von dem aus sich die P -Welle und die an der Erdoberfläche reflektierte Welle parallel fortpflanzen (Abb. 1.).

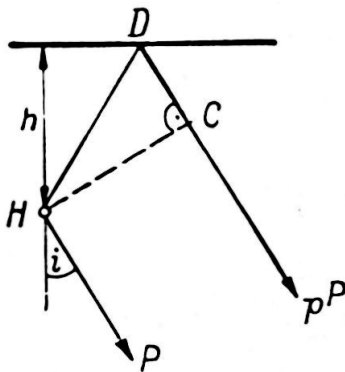


Abb. 1. Methode der Herdtiefenbestimmung nach Berlage [2]

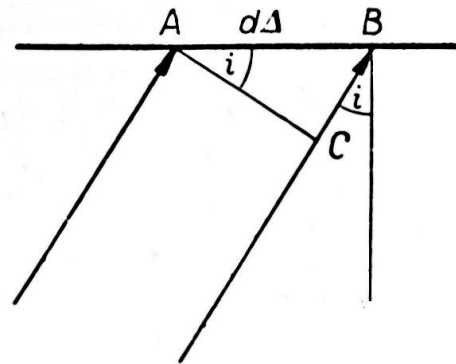


Abb. 2. Die in Epizentralentfernung die Erdoberfläche erreichende Wellenfront

Es besteht folgende Beziehung:

$$\left. \begin{aligned} t_{pP-P} &= \frac{1}{v} (\overline{HD} + \overline{DC}), \\ t_{pP-P} &= \frac{1}{v} \left(\frac{h}{\cos i} + \frac{h}{\cos i} \cos 2i \right), \\ t_{pP-P} &= \frac{2h \cos i}{v}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Aus Symmetriegründen ist der Emergenzwinkel in der Nähe des Epizentrums und an der Station derselbe, wenn in beiden Gebieten gleiche Geschwindigkeiten v der elastischen Wellen angenommen werden. Aus der scheinbaren Geschwindigkeit der entlang der Erdoberfläche laufenden Wellen in der Epizentralentfernung Δ und der angenommenen Wellengeschwindigkeit v in den Krustenschichten wurde der Inzidenzwinkel i ermittelt (Abb. 2).

Für zwei nahe Punkte A und B in einer Entfernung $d\Delta$ wird die Zeitdifferenz dt der Ankunftszeit einer Welle bestimmt. Es gilt:

$$\overline{CB} = \overline{AB} \sin i, \quad v = \frac{\overline{CB}}{dt}.$$

Somit ist

$$\sin i = v \frac{dt}{d\Delta}. \quad (7)$$

3. Daten und ihre Aufbereitung

Mit der beschriebenen Methode wurden Registrierungen von sechs unterirdischen Kernexplosionen analysiert. Verwendet wurden Aufzeichnungen von einem kurzperiodischen Vertikalseismographen vom Typ VSJ-2 an der seismologischen Station Collmberg (CLL). Die Verstärkungscharakteristik des Seismographen ist in Abb. 3 dargestellt.

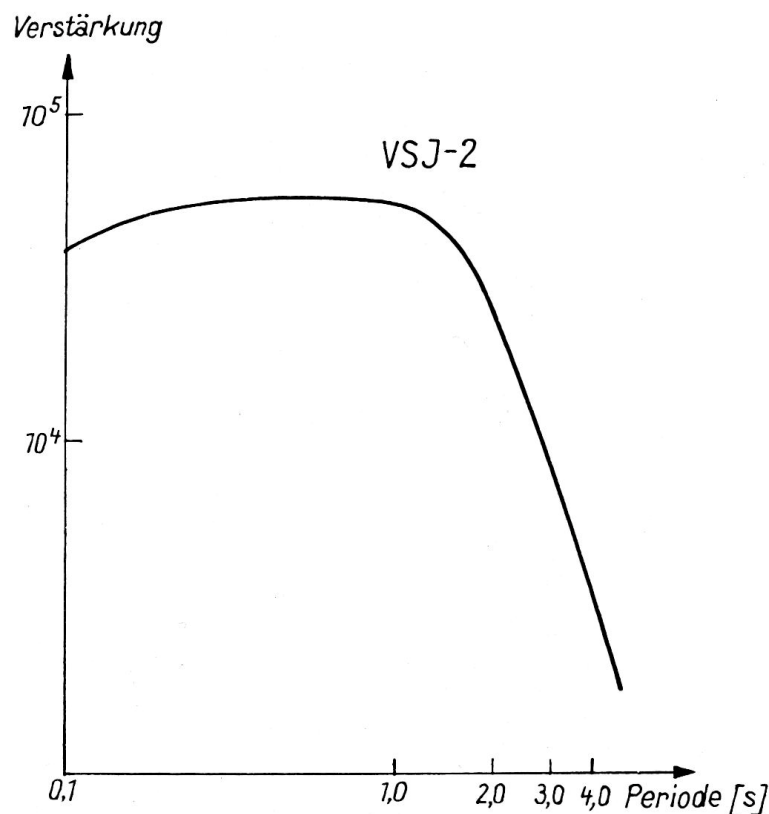


Abb. 3. Verstärkungscharakteristik des kurzperiodischen Vertikalseismographen vom Typ VSJ-2 der Station Collmberg

Die sechs untersuchten ersten Einsätze der Registrierungen (Abb. 4) stammen von drei sowjetischen Detonationen des Semipalatinsker Testgebiets (Abb. 4a) und drei amerikanischen Tests (Abb. 4b). Von den letzteren wurden zwei (JORUM und HANDLEY) im Nevada-Testgebiet und die dritte (CANNIKIN) im Amchitka-Testgebiet gezündet. Die verfügbaren Daten über diese seismischen Ereignisse sind in Tab. 1 zusammengestellt. Die Informationen entstammen SPRINGER u. KINNA-

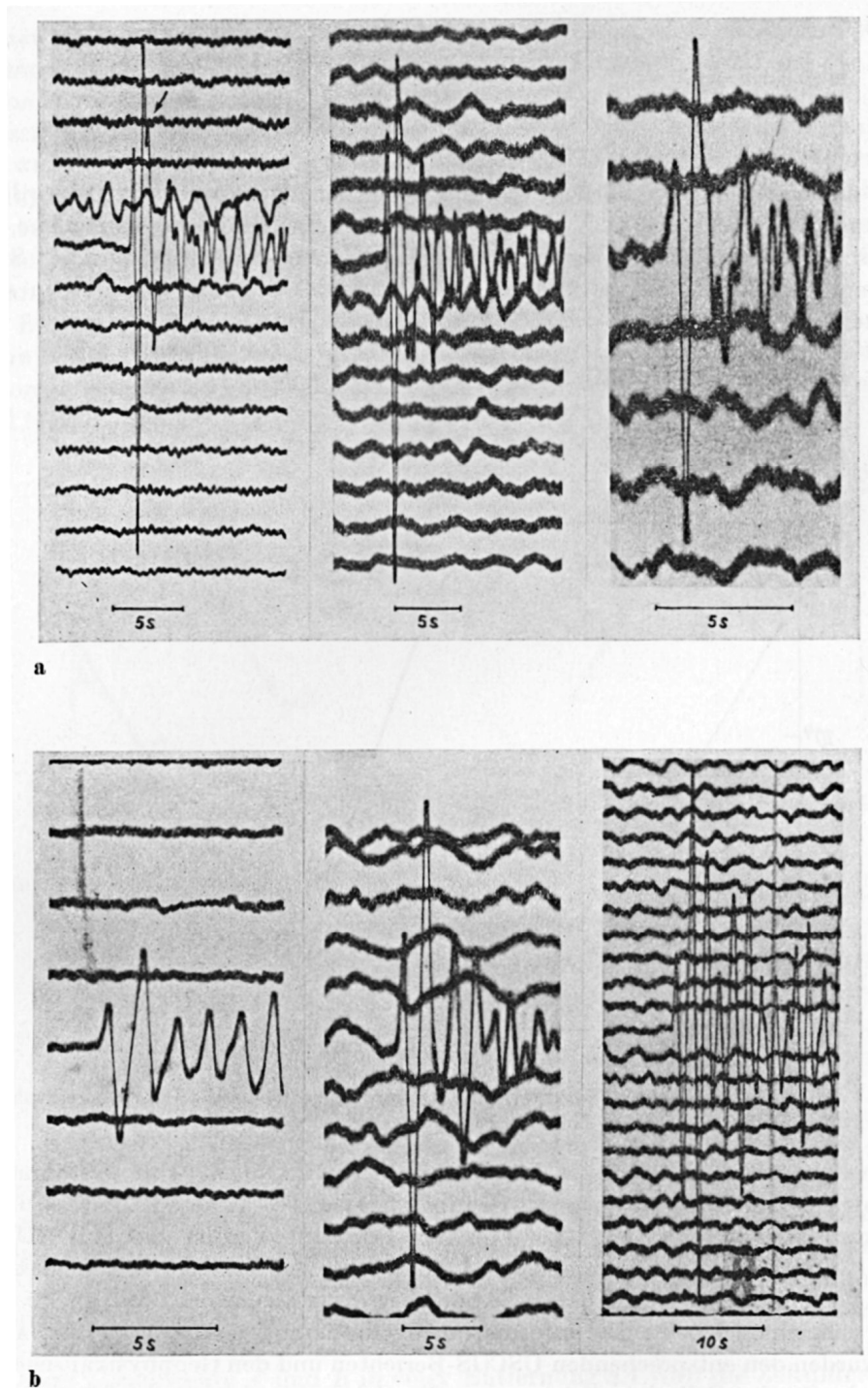


Abb. 4. Kurzperiodische Vertikalkomponenten-Registrierungen von unterirdischen Kernexplosionen an der Station Collmberg; **a** aus dem Semipalatinsker Testgebiet (v. l. n. r.: STS-A, STS-B, STS-C), **b** aus dem Nevada- bzw. Amchitka-Testgebiet (v. l. n. r.: JORUM, HANDLEY, CANNIKIN)

MAN [9] bzw. wurden den entsprechenden USCGS-Berichten und den Geophysikalischen Meßreihen der Station Collmberg entnommen. Die Seismogramme wurden photographisch fünf- bzw. zehnfach vergrößert und manuell im Abtastschritt von 0,1 s bzw. 0,05 s digitalisiert. Die Aufzeichnungen der *P*-Wellen der Tests STS-A und STS-B (siehe Tab. 1) wurden lediglich fünffach vergrößert und im Abstand von 0,1 s digitalisiert, weil eine Digitalisierung bei zehnfacher Vergrößerung und diese starke Vergrößerung selbst mit technischen Schwierigkeiten verbunden wären.

Der Abtastschritt von 0,1 s entspricht durchaus den Anforderungen einer dynamischen Untersuchung, jedoch erlauben die Analysen der im Abtastschritt von 0,05 s digitalisierten Signale eine genauere Bestimmung der Einsatzzeiten von Interferenzen im Cepstrum.

Die Quelleneigenschaften der unterirdischen Fernexplosionen sind sicherlich Ursache dafür, daß *P*-Wellen, die in teleseismischen Entfernungen aufgezeichnet werden, stets maximale Amplituden nur in wenigen Schwingungen nach der ersten Bodenbewegung haben und sich die Amplituden sehr rasch verkleinern, bis dann spätere Phasen (z. B. *PcP*) beobachtet werden. Besonders deutlich zeigt sich dies bei den abgebildeten Aufzeichnungen der *P*-Wellen der Semipalatinsker Tests (Abb. 4a). Die Länge der analysierten Beispiele wurde so gewählt, daß eben gerade der größte Teil der Energie der *P*- und *pP*-Welle erfaßt wurde, d. h., es wurden Rechteckfenster von 4,5 s bis etwa 6,0 s verwendet.

Die Möglichkeit, daß *PcP*-Phasen innerhalb der analysierten Signale einsetzen, ist auszuschließen, da sie bei einer Epizentralentfernung von 81° (Nevada-Tests) etwa 6 s nach dem Eintreffen von *P* und für die Aufzeichnungen der Amchitka-Tests sogar erst bei 11 s nach *P* zu erwarten sind.

Um im Spektrum Effekte, die durch ungeeignetes Abschneiden der Signale entstehen können, einzuschränken, wurden die Fenster jeweils so gewählt, daß der analysierte Schwingungszug mit einem Nulldurchgang der Schwingung endet. Zur Betonung der vorderen im Signal auftretenden Charakteristiken wurden zusätzlich Analysen mit dem den hinteren Teil des Signals stark dämpfenden HANNING-Fenster durchgeführt. Die minimale Länge des Fensters beträgt bei den kurzen Signalen 4,5 s, während bei Signalen, die länger als 4,5 s sind, die Fensterlänge gleich der Signallänge ist.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1. Kernexplosion STS-A

4.1.1. Erläuterungen zur Methode

Die Abb. 5a bis g zeigen die Analyseergebnisse für das in Tab. 1 mit STS-A bezeichnete Signal, das sehr einfache Interferenzstrukturen aufweist und sich somit gut zu einigen Erläuterungen zur Methode eignet.

Betrachten wir das Cepstrum und das Spektrum des mit dem stark dämpfend wirkenden Fenster multiplizierten Signals (Abb. 5a und b), dann sieht man auf der Abszisse des Cepstrums bei 0,8 s einen Peak, der aus dem sich bis 0,6 s erstreckenden ungestörten Wavelet-Anteil des Cepstrums herausragt. Da dieser Peak be-

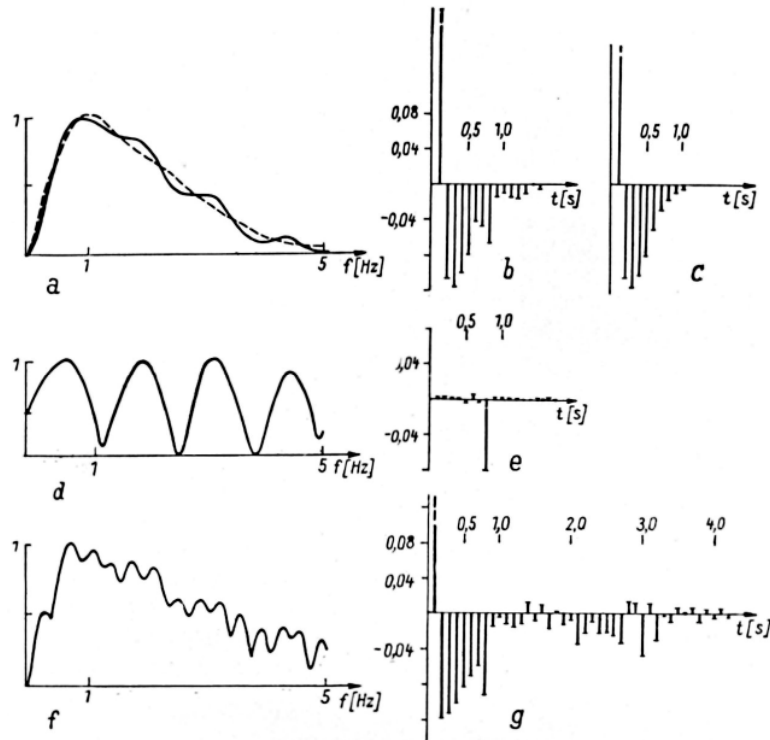


Abb. 5. Ergebnisse der Analyse des Signals von der unterirdischen Kernexplosion STS-A, **a** Amplitudenspektrum des Signals bei Fensteranwendung und versuchsweise eingezeichnetes vermutetes glattes Spektrum (gestrichelt); **b** Cepstrum des Signals bei Fensteranwendung; **c** Cepstrum des glatten Spektrums (Wavelet-Anteil); **d** Differenz beider Spektren aus Abb. 5a (normiert auf Eins und minimumreduziert); **e** Cepstrum der Spektrendifferenz aus Abb. 5d; **f** Amplitudenspektrum des Signals ohne Fensteranwendung; **g** Cepstrum des Signals ohne Fensteranwendung

tragsmäßig stärker negativ als die zum Wavelet-Anteil des Cepstrums gehörende kontinuierliche, negative Peakfolge ab 0,15 s ist, soll solch ein Interferenzeinsatz im folgenden als negativ bezeichnet werden, was gleichzeitig Aufschluß über die Entstehung der betreffenden Interferenz gibt. Es gilt als sicher, daß der sich bei 0,8 s abzeichnende Peak das Eintreffen eines Einsatzes widerspiegelt, der nicht wie die zuerst eintreffende *P*-Welle Kompression zeigt, sondern durch Reflexion der vom Quellenimpuls ausgehenden elastischen Welle an einer Schicht mit negativem Reflexionskoeffizienten entstand. Gleichzeitig wird deutlich, daß sich beiderseits des Peaks eine Undulation zeigt, die z. T. vom Peak selbst erzeugt wird und in Verbindung mit der Wirkung des Fensters das Cepstralbild etwas unscharf macht, während bei der Fensteranwendung spätere Cepstralpeaks nicht mehr abgebildet werden.

Die dargestellten Amplitudenspektren sind logarithmiert und auf Eins normiert. Dadurch zeigen sie ein nur allmähliches Abfallen zu höheren Frequenzen bei starker Betonung der ihnen anhaftenden Interferenzen, die das Spektrenbild bis zur NYQUIST-Frequenz von 10 Hz (beim Abtastschritt von 0,05 s) bzw. 5 Hz (beim Abtastschritt von 0,1 s) prägen. - In dem in Abb. 5a dargestellten Amplitudenspektrum macht sich nur eine sinusförmige Undulation bemerkbar, die den zweiten Term in (4) bzw. (5) widerspiegelt.

Zur unabhängigen Darstellung des ersten und zweiten Terms in (4) bzw. (5) im Cepstralbereich wurde versucht, das glatte, interferenzfreie Spektrum in das be-

rechnete Spektrum einzuzeichnen (gestrichelte Linie in Abb. 5a). Anschließend wurde die Differenz zwischen versuchsweise eingezeichnetem und berechnetem Spektrum gebildet, was entsprechend (5) annähernd eine Folge von positiven Sinushalbwellen ergibt (Abb. 5d). Aus der Erstreckung der Sinushalbwellen über einen entsprechenden Frequenzbereich läßt sich so unmittelbar die Zeitdifferenz τ zwischen zwei miteinander interferierenden Signalen annähernd gleichen Dynamikinhalt ablesen. Es gilt:

$$\tau = \frac{n}{f_n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

wobei f_n der Frequenzwert ist, in dem eine Sinushalbwellen einsetzt. Aus dem in Abb. 5d gezeigten Interferenzanteil des Spektrums ergibt sich für die bis 5 Hz auftretenden vier positiven Sinushalbwellen:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \frac{n}{f_n} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{1,28 \text{ Hz}} + \frac{2}{2,50 \text{ Hz}} + \frac{3}{3,76 \text{ Hz}} + \frac{4}{4,95 \text{ Hz}} \right) = 0,797 \text{ s.}$$

Dieses Resultat entspricht dem mittels der Cepstralanalyse des Signals ermittelten Wert für τ von 0,8 s.

Bei der Transformation der Folge der Sinushalbwellen, die das Interferenzbild im Frequenzbereich darstellen, in den Zeitbereich des Cepstrums bildet sich der reine Interferenzanteil des Cepstrums ab (Abb. 5e), der wiederum den Peak bei 0,8 s zeigt. Eine Transformation des glatten Spektrums (gestrichelte Linie in Abb. 5a) liefert das interferenzfreie Cepstrum, das dessen reinen Wavelet-Anteil widerspiegelt (Abb. 5 c).

Wie macht sich nun aber der aus den Analyseergebnissen abgeleitete Interferenzeinsatz im Signal deutlich, in dem lediglich bei 1,2 s nach der ersten Bodenbewegung ein positiver Einsatz (Pfeil in Abb. 4a) im sonst ungestört aussehenden Schwingungsbild zu erkennen ist?

Tabelle 1. Angaben über die analysierten Explosionen

Testbezeichnung u. Datum (GMT)	Schußzeit (GMT)			Geogr. Koordinaten			Testgebiet	Raumwellen-Magnitude (USCGS)	Schußtiefe
	[h]	[m]	[s]	[°]	[']	[^c]			
JORUM 16. 9. 1969	14	30	00,04	37	18	50,9 N 116 27 38,4 W	Nevada	6,2	1160
HANDLEY 26.3. 1970	19	00	00,2	37	18	01,7 N 116 32 02,8 W	Nevada	6,5	1205
STS-A 28.6. 1970	01	57	57,7	49,8 N 78,2 E			Semipalatinsk	5,9	
STS-B 25.4. 1971	03	32	58,0	49,8 N 78,1 E			Semipalatinsk	5,9	
CANNIKIN 6. 11. 1971	22	00	00,1	51,5 N 179,1 E			Amchitka	6,8	1791
STS-C 30.12.1971	06	20	57,7	49,8 N 78,111			Semipalatinsk	5,8	

Davon ausgehend, daß das Schwingungsbild des Interferenzeinsatzes bei 0,8 s dem der P -Welle ähnelt, aber umgekehrt polarisiert ist, läßt sich der positive Einsatz bei 1,2 s folgendermaßen erklären: Die erste Bodenbewegung zeigt für P Kompression. Gerade zu dem Zeitpunkt der Schwingung setzt der die Interferenz erzeugende Einsatz ein, in dem der Schwingungszug seine größte Flankensteilheit hat (kurz vor Vollendung der ersten Periode). Die Dilatation aufweisende erste Bewegung des Interferenzeinsatzes kann in diesem Teil des Schwingungszuges keinen sichtbaren Einsatz ausbilden, sondern überprägt lediglich die nun steil zu positiven Werten strebende Schwingung der P -Welle mit relativ negativen Amplitudenwerten. Damit wird die Steilheit der Flanke der folgenden Halbschwingung geschwächt und ihre Amplitude gegenüber dem interferenzfreien Signal verringert sein, da bei den zu erwartenden positiven Extrema dieser Halbschwingung die erste Halbschwingung des Interferenzeinsatzes ihren Umkehrpunkt hat. Da der Interferenzeinsatz in seiner nun folgenden positiven Halbschwingung vermutlich große Flankensteilheit aufweisen wird, kommt es in der abklingenden dritten Halbschwingung zur Ausbildung des ausgeprägten positiven Astes bei 1,2 s. Während sich die klassische kinematische Interpretation auf solche hervorstechenden Merkmale wie den bei 1,2 s auftretenden Ast stützen muß, kann ein mittels der auf die Auswertung der Dynamik beruhenden Cepstralanalyse klar zu identifizierender Einsatz als frei von jeglicher Subjektivität identifiziert betrachtet werden.

Die Analyse des Signals ohne Fensteranwendung liefert auch die bis nahezu zum Ende des Zeitintervalls auftretenden Einsätze von im Schwingungszug enthaltenen Wellen (Abb. 5f und g). Das Amplitudenspektrum zeigt auch dementsprechende höherfrequente Sinushalbschwingungen, die auf die sich im zugehörigen Cepstrum abbildenden negativen Peaks bei 2,1 s und 3,0 s hinweisen. Peaks, die zu Vielfachen der Verzögerungszeiten von reellen Peaks auftreten, sind nicht vorhanden. Der Einsatz bei 0,8 s tritt im Cepstrum frei von allen schmierenden Einflüssen klar aus dem ausklingenden Wavelet-Anteil des Cepstrums hervor.

4.1.2. *Bestimmung der Schußtiefe*

Wird der Einsatz bei 0,8 s der tiefen Phase zugeordnet, so kann bei Anwendung der in Gleichung (6) gegebenen Beziehung die Schußtiefe bestimmt werden, wobei für die vom Semipalatinsker Testgebiet empfangenen P -Wellen der Inzidenzwinkel nicht vernachlässigt werden darf. Zur Ermittlung des Inzidenzwinkels für Wellen aus diesem Herdgebiet wurden die Ankunftszeiten der P -Wellen an der seismologischen Station Collmberg (CLL) und an der seismologischen Station Moxa (MOX) verwendet.

Die Wellenfront hat an der Erdoberfläche nach dem Passieren der Station CLL bei dem für P -Wellen aus dem betrachteten Herdgebiet gültigen Azimut bis zur Ankunft an der Station MOX etwa 120 km zurückzulegen. Die mittlere Differenz der Ankunftszeiten der Wellenfront an beiden Stationen beträgt 9,3 s, woraus sich unter Annahme einer Geschwindigkeit von $5,5 \text{ km s}^{-1}$ unter der Station CLL durch Anwendung von Gleichung (7) ein Inzidenzwinkel von etwa 25° im Empfangsgebiet ergibt. Da aus Symmetriegründen der Inzidenzwinkel im Herdgebiet und im Empfangsgebiet gleich ist, sofern die seismischen Geschwindigkeiten der anstehenden Gesteine in beiden Gebieten nicht differieren, läßt sich der zur Bestimmung der

Schußtiefe nötige Abstrahlwinkel für die seismischen Wellen angeben. Dabei wird der Fehler klein sein, wenn zur Ermittlung des Winkels am Herd für dieses Gebiet eine seismische Geschwindigkeit des anstehenden Gesteins angenommen wird, die etwas von der im Empfangsgebiet gültigen abweicht, und die verschiedenen Höhen über NN für beide Gebiete vernachlässigt werden.

Geologische Karten weisen für die drei hier untersuchten Aufzeichnungen von seismischen Ereignissen des Semipalatinsker Testgebiets aus, daß in ihrem Herdgebiet Granit ansteht.

Registrierungen von unterirdischen Kernexplosionen zeichnen sich im allgemeinen durch eine scharfe Bündelung der Energie der *P*-Welle auf nur wenige Schwingungszüge unmittelbar nach der ersten Bodenbewegung aus, die selbst auch sehr deutlich ausgeprägt ist. Nach den ersten Schwingungszügen fällt die Energie abrupt ab. Die Aufzeichnungen des Semipalatinsker Testgebiets zeigen besonders stark ausgeprägt diese Eigenschaft. Diese Merkmale lassen darauf schließen, daß am Herd die Übertragungsbedingungen für die bei der Detonation freiwerdende Energie zur Anregung elastischer Wellen gut sind. Dies ist der Fall bei relativ schallhartem und annähernd homogenem Gesteinsmaterial.

Somit wird der für das Empfangsgebiet ermittelte Inzidenzwinkel kaum von dem Wert abweichen, der für das Herdgebiet zutrifft. Für den sich über das Semipalatinsker Testgebiet erstreckenden Granitkomplex kann in seinen oberen Bereichen eine Geschwindigkeit der seismischen Wellen von $5,0 \text{ km s}^{-1}$ angenommen werden, woraus sich bei einem Inzidenzwinkel von etwa 23° im Herdgebiet nach (6) eine Schußtiefe von 2170 m ergibt, wenn der Einsatz bei 0,8 s als tiefe Phase interpretiert wird.

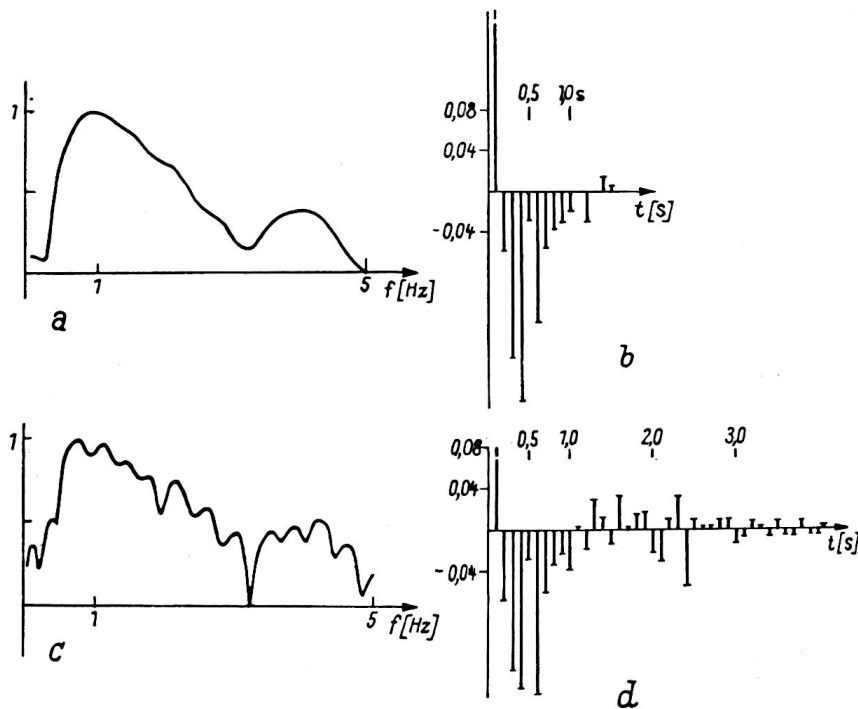


Abb. 6. Ergebnisse der Analyse des Signals von der unterirdischen Kernexplosion STS-B. **a** Amplitudenspektrum des Signals bei Fensteranwendung; **b** aus a abgeleitetes Cepstrum; **c** Amplitudenspektrum ohne Fensteranwendung; **d** aus c abgeleitetes Cepstrum

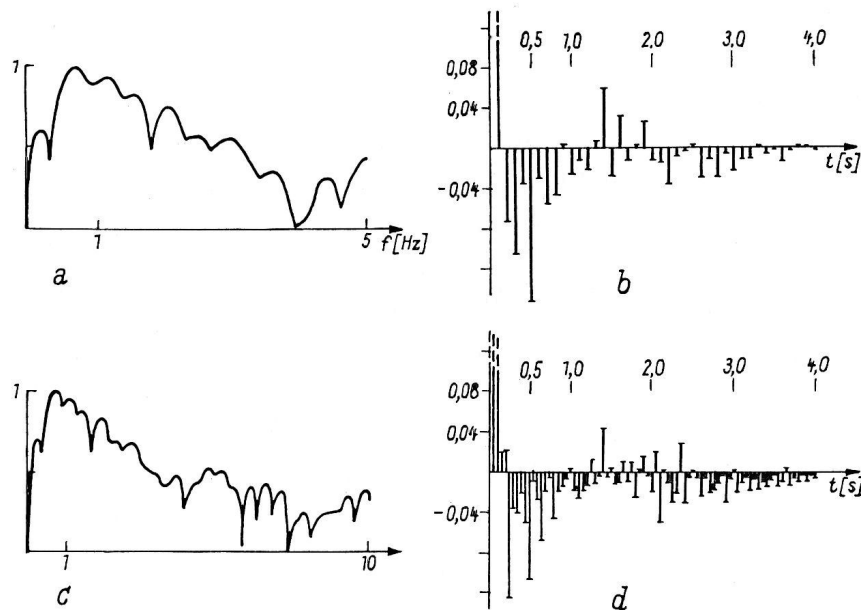


Abb. 7. Ergebnisse der Analyse des Signals von der unterirdischen Kernexplosion STS-C. **a** Amplitudenspektrum des im Abtastschritt von 0,1 s digitalisierten Signals; **b** aus a abgeleitetes Cepstrum.; **c** Amplitudenspektrum des im Abtastschritt von 0,05 s digitalisierten Signals; **d** aus c abgeleitetes Cepstrum

4.2. Kernexplosion STS-B

Das Cepstrum des Signals STS-B aus der Semipalatinsker Testserie zeigt etwas andere Strukturen. Im Cepstrum des mit dem HANNING-Fenster multiplizierten Signals (Abb. 6b) ist eine Einbuchtung des Wavelet-Anteils bei 0,5 s sehr auffällig.

Außerhalb des Wavelet-Anteils liegt lediglich ein schwacher negativer Peak bei 1,2 s. Wie auch schon bei den Analyseergebnissen des Signals STS-A zu erkennen ist, wird der Interferenzpeak in Verbindung mit dem ausklingenden Wavelet-Anteil des Cepstrums von weniger negativen Werten umgeben. Dies ist auch für das Cepstrum des Signals STS-B anzunehmen, wenn die Einbuchtung bei 0,5 s dahingehend interpretiert wird, daß sie von dem dann bei 0,6 s liegenden Peak erzeugt wird. Der Peak bei 1,2 s ist damit nichts anderes als ein einfacher Vielfacher des Interferenzpeaks bei 0,6 s. Der Einsatz der tiefen Phase ist in diesem Signal also bei 0,6 s anzunehmen. Der Wavelet-Anteil des Cepstrums des Signals STS-B ist gegenüber dem des Signals STS-A, in dem die Interferenz später einsetzt, gestörter. Im Amplitudenspektrum macht sich die Undulation, die der Einsatz der tiefen Phase bei 0,6 s auf der zu höheren Frequenzen abfallenden Flanke des Spektrums hervorruft, nicht so deutlich wie im Signal STS-A bemerkbar. Das Cepstrum des ohne Fensteranwendung analysierten Signals (Abb. 6d) zeigt neben dem bei dieser Cepstrenberechnung deutlicher zu erkennenden Einsatz der tiefen Phase weitere, jedoch schwächere Einsätze bei 1,3 s und 1,6 s mit Kompression und bei 2,1 s und 2,4 s mit Dilatation.

Aus den Analyseergebnissen kann für die Detonation STS-B eine Schußtiefe von etwa 1630 m angegeben werden. Dieser Wert entspricht durchaus den für andere Testgebiete bekannten Herdtiefen.

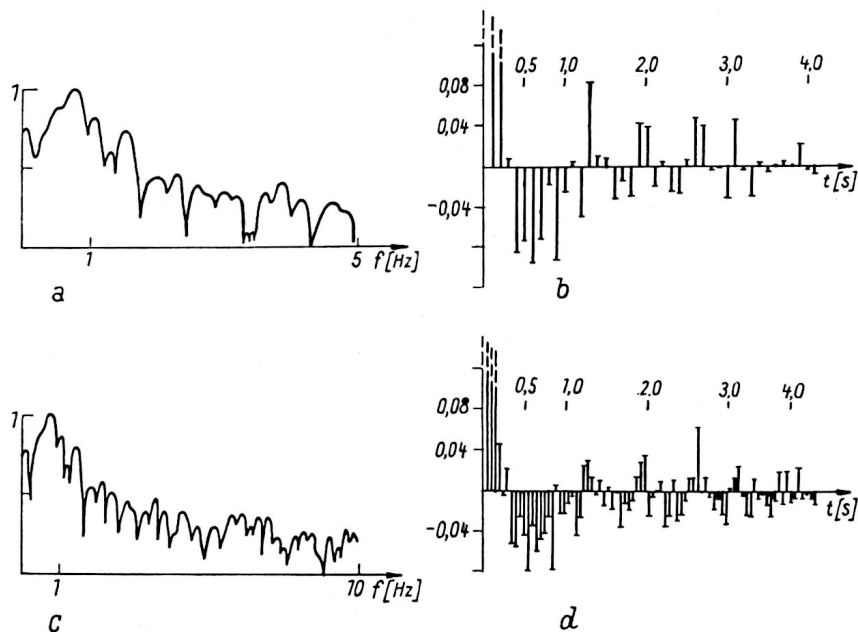


Abb. 8. Ergebnisse der Analyse des Signals von der unterirdischen Kernexplosion JORUM; Erläuterungen siehe Abb. 7

Da die Cepstren bei Fensteranwendung keine zusätzlichen Informationen liefern, sondern hier den Zweck hatten, die Methode anschaulicher darzustellen, werden von den folgenden Beispielen nur die Ergebnisse des ohne Fenster analysierten Signals dargestellt.

4.3. Kernexplosion STS-C

Der Schwingungszug der *P*-Welle des Signals STS-C wurde mit zwei verschiedenen Abtastschritten digitalisiert und analysiert. Die Abb. 7a und b zeigen das Amplitudenspektrum und das Cepstrum bei einem Abtastschritt von 0,1 s und Abb. 7c und d die Analyseergebnisse bei einem Abtastschritt von 0,05 s. Bei Berechnung mit dem feineren Abtastschritt ist es möglich, die spektrale Zusammensetzung des Signals bis zu 10 Hz zu bestimmen, und die Ankunftszeiten der im Signal enthaltenen Einsätze können dementsprechend genauer angegeben werden, weil die Anzahl der Cepstralpeaks pro Zeiteinheit gleich der Anzahl von abgetasteten Werten pro Zeiteinheit ist.

Da sich die Zeiten des Eintreffens der Interferenzeinsätze auf die erste Bodenbewegung beziehen, ist jedoch dabei zu berücksichtigen, daß sich mit der Verkleinerung des Abtastschrittes nur dann eine Verdoppelung der Genauigkeit bei der Bestimmung der Einsatzzeit auf $\pm 0,025$ s erreichen ließe, wenn die Festlegung des Beginns der ersten Bodenbewegung ebenfalls mit einem Fehler von $\pm 0,025$ s möglich wäre. Diese Forderung kann bei den hier verwendeten Signalen wohl kaum realisiert werden. Demzufolge ist bei einer durchaus gewährleisteten Abtastgenauigkeit von 0,05 s die Bestimmung der Schußtiefe mit einem Fehler von $\pm 1,00$ m möglich.

Im Cepstrum des im Abtastschritt von 0,1 s digitalisierten Signals ist im Wavelet-Anteil deutlich ein negativer Peak bei 0,5 s zu erkennen, den wieder die schon

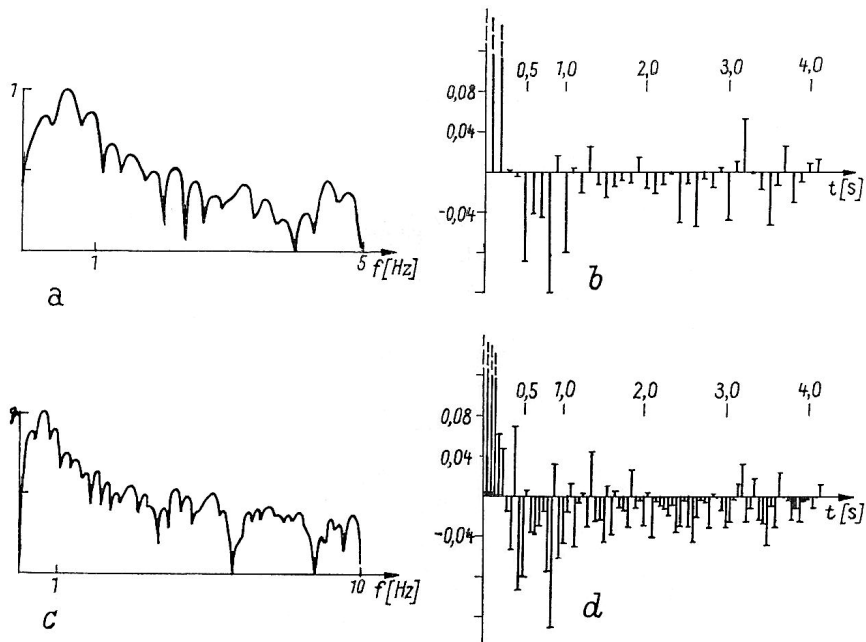


Abb. 9. Ergebnisse der Analyse des Signals von der unterirdischen Kernexplosion HANDLEY; Erläuterungen siehe Abb. 7

vorher beschriebenen Einbuchtungen umgeben. Dieser Peak zeigt mit großer Wahrscheinlichkeit den Einsatz der tiefen Phase an, woraus sich die Schußtiefe der Explosion STS-C zu 1360 m bestimmen läßt. Die Analyse mit dem feineren Abtastschritt liefert ein wesentlich unruhigeres Bild des Cepstrums. Dies ist auch zu erwarten, da eine Interpolation im Cepstralbereich nicht linear ist, sondern durch die Funktion $\sin x/x$ realisiert wird. Die Amplitudenspektren sind bis 5 Hz in ihren charakteristischen Formen bis auf vernachlässigbare Einzelheiten identisch; lediglich die Absolutwerte der einzelnen spektralen Komponenten unterscheiden sich. Im feiner auflösenden Cepstrum ist der Einsatz bei 0,5 s wieder vorhanden. Der Wavelet-Anteil des Cepstrums ist so gestört, daß er nur noch aus der Form der Folge der Peaks bei 0,25 s, 0,65 s und 0,80 s zu erkennen ist. Die Identifizierung der tiefen Phase allein aus dem feiner auflösenden Cepstrum wäre nicht möglich.

4.4. Kernexplosion JORUM

Die Spektren und Cepstren der *P*-Welle der Explosion JORUM sind in den Abb. 8a bis d dargestellt. Diese Explosion der Nevada-Testserie wurde im Gebiet des sich über 320 km² erstreckenden Hochplateaus Pahute Mesa gezündet. Das vorherrschende Gestein in diesem Gebiet sind flach lagernde tuffogene Sedimente, z. B. Flugaschen pliozänen Alters. In größeren Tiefen sind Lavadecken zwischengelagert (BUCKMAN [5]). Die Mächtigkeit dieses vulkanischen Gesteinskomplexes beträgt etwa 4200 m (LEE u. NICHOLS [8]). Die Detonation wurde in 1160 m Tiefe gezündet.

Im Cepstrum mit dem Abstand der Peaks von 0,1 s (Abb. 8b) ist ein negativer Peak bei 0,9 s zu erkennen. Das feiner auflösende Cepstrum zeigt diesen Peak jedoch schon bei 0,85 s. Ein bei 0,6 s bzw. 0,55 s zu erkennender Einsatz gehört zweifelsohne zur Folge der Wavelet-Peaks.

Stellt dieser Peak bei 0,85 s den Einsatz der tiefen Phase dar, so müßte für die mittlere Geschwindigkeit des Gesteins zwischen Erdoberfläche und Schußpunkt ein plausibler Wert angegeben werden können. Obwohl der Inzidenzwinkel im Herdgebiet nicht groß sein wird, sollte er möglichst nicht vernachlässigt werden. Die Laufzeiten der *P*-Welle zwischen der Station CLL und der seismologischen Station Pruhonice (PRU) in der ČSSR beträgt 8,8 s. Zwischen beiden Stationen legt die Wellenfront etwa 179 km an der Erdoberfläche zurück. Daraus und mit einer angenommenen Geschwindigkeit von etwa $3,0 \text{ km s}^{-1}$ in Herdtiefe erhält man als Inzidenzwinkel $8,5^\circ$. Aus der abgeleiteten Verzögerungszeit zwischen der direkten Welle und der tiefen Phase sowie aus der ohnehin bekannten Schußtiefe für diese Explosion kann nach Gleichung (6) somit für die oberflächennahen Gesteine im Testgebiet Pahute Mesa bei einem Abtastfehler von $+ 0,05 \text{ s}$ eine Geschwindigkeit von $2,70 + 0,16 \text{ km s}^{-1}$ angegeben werden. Unter der Annahme einer niedrigeren Geschwindigkeit in unmittelbarer Nähe der Erdoberfläche wird die reale Geschwindigkeit in Herdtiefe entsprechend höher sein.

4.5. Kernexplosion HANDLEY

Die Explosion HANDLEY wurde in unmittelbarer Nähe des Einsturzkraters der Explosion JORUM in annähernd gleicher Tiefe gezündet. Somit dürfte die aus den Analyseergebnissen für HANDLEY anzugebende Geschwindigkeit nur wenig von der für JORUM errechneten abweichen.

Während im gröberen Cepstrum (Abb. 9b) bei 0,8 s ein starker Peak den Einsatz der tiefen Phase andeutet, weist im feiner auflösenden Cepstrum (Abb. 9d) bei 0,85 s ein ausgeprägter Peak auf die tiefe Phase hin. Für die Herdtiefe der Explosion HANDLEY werden 1205 m angegeben. Daraus ergibt sich für das Gestein eine mittlere Geschwindigkeit von $2,80 \pm 0,17 \text{ km s}^{-1}$.

Zweck der hier dargestellten Untersuchungen ist es nicht, genaue Angaben zur seismischen Geschwindigkeit im Herdgebiet zu machen, sondern es sollte die prinzipielle Anwendbarkeit der Methode der Cepstralanalyse auf derartige Probleme aufgezeigt werden.

4.6. Kernexplosion CANNIKIN

Weiter wurde aus der Amchitka-Testserie die Explosion CANNIKIN analysiert, die in einer Herdtiefe von 1791 m gezündet wurde. Für das in Herdtiefe befindliche Gestein geben SPRINGER u. KINNAMAN [9] Pillow-Lava an. Aus einer angenommenen Geschwindigkeit von $5,5 \text{ km s}^{-1}$ im Herdgebiet und einer Zeitdifferenz der zwischen CLL und MOX eintreffenden Wellen von 5,1 s bei einem Laufweg der Wellenfront an der Oberfläche zwischen beiden Stationen von etwa 94 km erhält man als Inzidenzwinkel 17° .

In den Cepstren (Abb. 10b und d) läßt ein deutlicher Peak bei 0,70 s auf den Einsatz der tiefen Phase schließen, woraus sich für das Testgebiet eine mittlere Geschwindigkeit zwischen Schußtiefe und Oberfläche von $4,88 \pm 0,35 \text{ km s}^{-1}$ ergibt. Die hier abgeleitete Geschwindigkeit für die in sehr mannigfaltiger Weise vorkommen-

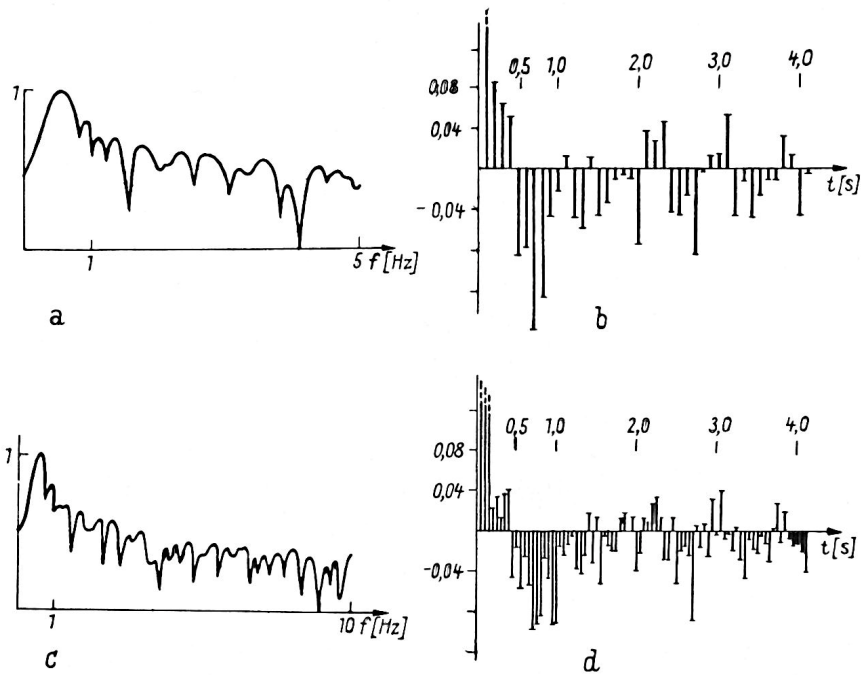


Abb. 10. Ergebnisse der Analyse des Signals von der unterirdischen Kernexplosion CANAKIN; Erläuterungen siehe Abb. 7

den Laven kann durchaus die realen geologischen Bedingungen im Testgebiet widerspiegeln.

4.7. Bemerkungen zu späteren Cepstraleinsätzen

Die berechneten Cepstren ließen recht gut Angaben zu jeweils einem Peak zu, der von der tiefen Phase hervorgerufen wurde und im allgemeinen als stärkster Einsatz auftritt. Eine Zuordnung der später erfaßten Einsätze ist wegen der außerordentlichen Mannigfaltigkeit ihrer möglichen Herkunft jedoch schwierig.

Nur eine größere Zahl von reproduzierbaren Peaks in Cepstren von *P*-Wellen von Ereignissen verschiedener Herdregionen würde auf einen sicheren Einsatz einer Reverberation in den Krustenschichten unter der Empfangsstation schließen lassen. Alle anderen Peaks, soweit sie wirklich reell sind, d. h. keine Linearkombination reeller Peaks darstellen, müßten demnach aus dem Herdgebiet selbst stammen. Weitere Schlußfolgerungen sind bei Analyse von Registrierungen nur einer Station kaum möglich.

Die in den Cepstren der untersuchten Signale auftretenden späteren Einsätze, die vermutlich von Reverberationen in Krustenschichten hervorgerufen werden, sind in der folgenden Übersicht zusammengestellt. Es werden die Verzögerungszeiten der einzelnen späteren Einsätze zur ersten Bodenbewegung in Sekunden angegeben. Das Vorzeichen gibt Aufschluß über die Polarität des Einsatzes, wobei das positive Vorzeichen Kompression und das negative Dilatation bedeutet. Zeitangaben mit einer Stelle hinter dem Komma weisen darauf hin, daß dieser Wert dem Cepstrum des in Schritt von 0,1 s abgetasteten Signals entnommen wurde, während die Einsatzzeiten aus Cepstren der feiner abgetasteten Signale mit entsprechender Genauigkeit angegeben werden. Die Klammer soll andeuten, daß sich im zugehöri-

STS-A				-2,1			-3,0
STS-B		+1,3	+1,60	-2,1	-2,4		
STS-C		+1,4		-2,2			
		+1,40		-2,10			
JORUM	-1,2	+1,3				+2,6	(-3,0)
	-1,15	(+1,30)				+2,65	(-3,00)
HANDLEY	(-1,2)	+1,3		-2,4		-2,6	-3,0
	-1,15	+1,35			(-	(-2,60)	(-3,00)
				2,40)			+3,20
CANNIKIN			-2,0			-2,7	+3,1
			(-2,00)			-2,70	+3,05

gen Cepstrum ein Peak zeigt der jedoch nur unwesentlich aus der Folge der nicht-interpretierten Peaks herausragt und ohne Vergleich mit dem zugehörigen Cepstrum nicht interpretiert würde.

Auffällig ist das Eintreffen eines Einsatzes bei 2,1 s in allen drei Signalen des Semipalatinsker Testgebiets. Da dieser Einsatz in keinem der Signale der anderen Testgebiete ausgebildet ist, liegt der Schluß nahe, daß er charakteristisch für das Herdgebiet sei. Doch muß betont werden, daß am Herd ein Granitkomplex ansteht, der kaum ausgeprägte Horizonte aufweisen wird. Die Möglichkeit, daß gerade für das Azimut der *P*-Wellen aus diesem Testgebiet und dem für Wellen aus dieser Epizentralentfernung gültigen Inzidenzwinkel günstige Bedingungen zur Anregung einer Reverberation unter der Empfangsstation gegeben sind, kann auch nicht von der Hand gewiesen werden.

Die Tatsache, daß die Explosionen JORUM und HANDLEY im gleichen Testgebiet und in fast gleichen Tiefen gezündet wurden, zeigt sich in der außerordentlich guten Reproduzierbarkeit ihrer späteren Einsätze (bei 1,15 s, 1,3 s, 2,6 s, 3,00 s und 3,15 s bzw. 3,20 s), die sicherlich Reverberationen in dem recht stark geschichteten Untergrund Pahute Mesas zuzuschreiben sein werden. Diese Reproduzierbarkeit bringt sehr klar die hohe Empfindlichkeit der Cepstralanalyse zum Ausdruck. Bei visueller Betrachtung der von JORUM und HANDLEY registrierten Schwingungszüge, die wegen der unterschiedlichen Ladungsmengen beider Explosionen beträchtliche Amplitudendifferenzen aufweisen, deutet sich solch eine Wiederkehr von Reverberationseinsätzen bestimmt nicht an. - Weitere Aussagen sind anhand des bis jetzt vorliegenden Materials nicht zu treffen.

Für die großzügige Unterstützung bei der Bereitstellung des Datenmaterials möchte ich Herrn Dr. TITTEL, Geophysikalisches Observatorium Collm, meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Herrn Dr. GRÄSSL, Herrn Dr. BORMANN und Herrn Dr. AURASS sei an dieser Stelle für anregende Diskussionen und wertvolle Hinweise sowie für die mir gewährte Unterstützung in theoretisch-methodischen Fragen gedankt.

Literatur

- [1] AURASS, H., Spektrale Methoden zur Untersuchung geophysikalischer Zeitreihen, Diss. Karl-Marx-Univ. Leipzig (unveröff.).

- [2] BERLAGE, H. P., Jr., Zur Berechnung der Herdtiefe eines Fernbebens nach der *pP-P* Methode. Gerlands Beitr. Geophysik 44 (1935), 353-357.
- [3] BOGERT, B. P., HEALEY, M. J., u. J. W. TUKEY, The Frequency Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking. Proc. Symp. an Time Series Analysis, ed. by M. ROSENBLATT, New York 1963, 209-243.
- [4] BORMANN, P., Identification of Teleseismic Events in the Records of Moxa Station. Gerlands Beitr. Geophysik 81 (1972), 105-116.
- [5] BUCKMAN, R. C., Geologic Effects of the Benham Underground Nuclear Explosion. Bull. seism. Soc. Amer. 59 (1969), 2209-2220.
- [6] COHEN, T. J., Source-Depth Determinations Using Spectral Pseudo-Autocorrelation and Cepstral Analysis. Geophys. J. roy. astron. Soc. 20 (1970), 223-231.
- [7] GRÄSSL, S., u. H. AURASS, Einige spezielle Verfahren zur spektralen Bearbeitung großer Datenkomplexe. Vortrag, gehalten auf der Sommerschule der KAPG-Arbeitsgruppe 5.1 „Datenverarbeitung in den geophysikalischen Wissenschaften“, 1.-9. April 1973, Kühlungsborn.
- [8] LEE, F. T., u. T. C. NICHOLS, Jr., Stress Changes in Rock from Jorum Underground Nuclear Explosion, Sept. 16, 1969, Pahute Mesa, Nevada Test. Bull. seism. Soc. Amer. 62 (1972), 609-618.
- [9] SPRINGER, D. L. u. R. L. KINNAMAN, Seismic Source Summary for U. S. Underground Nuclear Explosions. Bull. seism. Soc. Amer. 61 (1971), 1073-1098.