

Westfälische Berggewerkschaftskasse
Abteilung Geophysik

Herner Straße 45
4630 Bochum 1

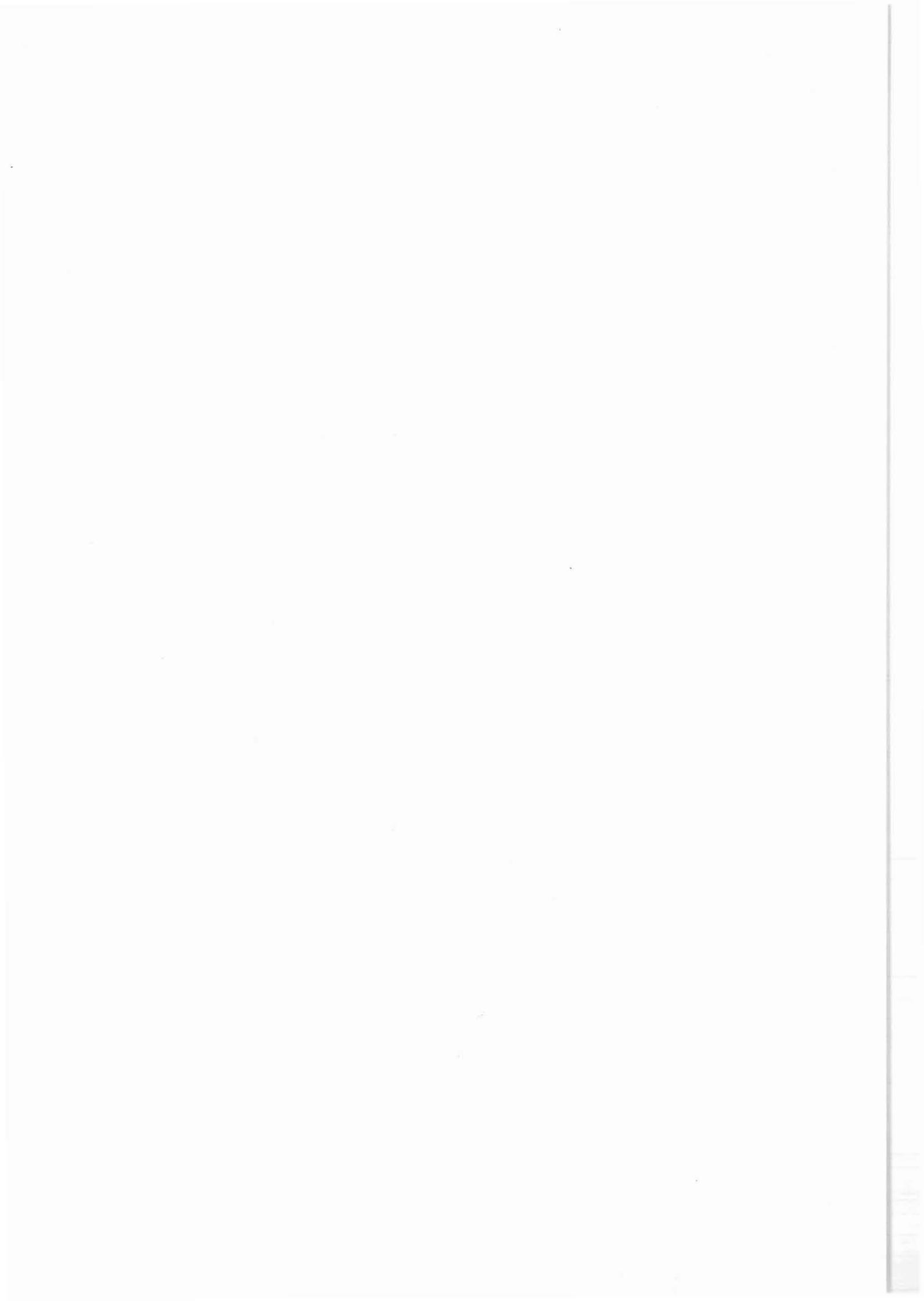
Bilder aus der Tiefe durch hochauflösende Abtastung der Bohrlochwand mit Ultraschallwellen

R. Schepers
St. Menger



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung.....	347
2. Einsatzmöglichkeiten des Televierers.....	348
3. Zur Theorie der Ultraschallabtastung.....	350
4. Theoretische Berechnung zur Wellenausbreitung.....	354
5. Korrektur des Amplitudenbildes.....	356
6. Korrektur des Laufzeitbildes.....	358
7. Möglichkeiten zur Verbesserung des Televierermessprinzips.....	363
8. Literaturverzeichnis.....	367
 Anhang	
Abbildungen 1 - 30.....	369



1 EINLEITUNG

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens hat das Institut für Geophysik der Westfälischen Berggewerkschaftskasse, Bochum, den Auftrag erhalten, eine Bohrlochsonde zur Abtastung der Bohrlochwand mit Ultraschallwellen - allgemein als Televiewer bezeichnet - weiter zu entwickeln für den Einsatz bei hohem Druck und hohen Temperaturen, wie sie in der KTB-Hauptbohrung zu erwarten sind. Gleichzeitig sollen die Qualität der Bilder und die Möglichkeiten zur quantitativen Analyse der Bildinformation durch Optimierung des Meßsystems und durch die Entwicklung geeigneter Datenbearbeitungsprogramme verbessert werden.

In den folgenden Kapiteln werden theoretische und praktische Untersuchungen zur Optimierung akustischer Meßsysteme dargestellt. Es werden Beispiele und Ansätze beschrieben zur Verbesserung der Bildqualität durch nachträgliche Datenbearbeitung. Basierend auf den im folgenden dargelegten Ergebnissen wurde eine erste Version eines neuen akustischen Meßsystems fertiggestellt. Nach umfangreichen Labor- und Feldtesten soll das neue Meßsystem in einem gesonderten Bericht vorgestellt werden. Alle im folgenden gezeigten Meßbeispiele wurden mit den beiden am Institut in den Jahren 1980 bis 1985 entwickelten Televiewermeßsystemen erzielt.

2 EINSATZMÖGLICHKEITEN DES TELEVIEWERS

Das Prinzip des "Televiewer" ist in Abbildung 1 dargestellt. In einem mit Öl gefüllten Teil der Bohrlochsonde befindet sich ein rotierendes, akustisches Sende- und Empfangssystem. Pro Umdrehung des akustischen Systems werden z.B. 256 Ultraschallimpulse ausgesandt, und es wird die Amplitude und die Laufzeit des an der Bohrlochwand reflektierten Ultraschallimpulses gemessen. Damit sich der Ultraschall auch im Außenbereich der Sonde fortsetzen kann, muß die Bohrung mit einer Flüssigkeit gefüllt sein. Bei kontinuierlicher Fahrt der Sonde im Bohrloch erhält man aus den Messungen der reflektierten Signale Bilder der Bohrlochwand. Die Bildzeilen entstehen durch Aneinanderreihen der 256 Werte einer jeden Umdrehung.

In einer solchen 2-dimensionalen Darstellung der Abrollung der Bohrlochwand entsprechen sinusförmige Strukturen der Schnittlinie einer Ebene mit der Bohrlochwand (Abb. 2a). Aus der Amplitude und Phase des Sinus kann bei Kenntnis des Bohrdurchmessers (Caliper) Einfallswinkel und Einfallrichtung der Ebene bestimmt werden.

In der Abbildung 3 ist der Vergleich zwischen einer Kernfotographie (oben) und dem mit einem Televiewer gemessenen akustischen Bild (unten) dargestellt. Eine Abrollung des Kerns wird sich von der Abrollung der Bohrlochwand unterscheiden, da Kern und Bohrloch unterschiedliche Durchmesser haben (Abb. 2b). Berücksichtigt man dies, lassen sich die beiden Klüfte bei 219 m und 220 m unschwer mit den beiden sinusförmigen schwarzen Linien im Televiewerbild korrelieren. Da die Televiewerbilder orientiert aufgenommen werden - die untere oder bei anderer Darstellung linke Bildkante entspricht magnetisch Nord - können anhand der Televiewerbilder die Kernstücke schnell und zuverlässig orientiert. Diese Orientierung von Kernen mit Hilfe der akustischen Bilder stellt auch bei der KTB-Bohrung eine wichtige Anwendung beim Einsatz des Televie-

wers dar. Neben den Klüften lassen sich aber auch strukturelle Unterschiede des Granits im akustischen Bild erkennen. Der Übergang vom Skelettgranit zwischen 217 m und 218 m zum kompakteren Granit bei 220 m wird durch die Abnahme der dunklen Flächen (geringe Reflexionsamplituden) deutlich.

Die Abbildung 4 zeigt ein Beispiel einer Televiwermessung in einem Sedimentgestein und zum Vergleich die geologische Kernaufnahme. "TV-Image 1" und "TV-Image 2" unterscheiden sich durch unterschiedliche Normierungsprozesse vor der Darstellung. Unter "TV-Imp" ist ein Log dargestellt, das aus den Televiwerbildern abgeleitet wurde und die relativen Unterschiede im Reflexionsverhalten der Bohrlochwand widerspiegelt. In beiden Bildern sind die Kohleflöze als graue Flächen sichtbar. Die schwarzen Linien in den grauen Flächen entsprechen Schlechten im Flöz. Das mehr oder weniger horizontale Schichteinfallen und größere, unterschiedliche Einfallswinkel insbesondere im Liegenden des Flözes bei 1212 m sind im rechten Bild deutlicher zu erkennen.

Als weiteres Beispiel für eine gute Televiwermessung ist in der Abbildung 5 die präzise Erfassung eines komplexen Kluftsystems in einem Gneis gezeigt. Die Daten sind hier in anderer Form dargestellt. Die Datenpunkte für eine bestimmte Richtung zur Bohrlochwand sind zu einer Spur verbunden, die in Flächenschrift ausgezeichnet wurde. Der gleiche Bohrlochabschnitt wurde links mit 32 und rechts mit 64 Spuren dargestellt. In dem Bohrlochabschnitt von nur 2 Metern lassen sich viele, teilweise überschneidende Klüfte, als gut korrelierbare Signale mit niedriger Amplitude (Ausschlag nach links) erkennen. Direkte Aussagen über Kluftweiten und über die hydraulischen Eigenschaften von Kluftsystemen lassen sich allein aus Televiwermessungen nicht machen (Schepers, 1988).

In den bisherigen Beispielen wurde nur die Amplitudeninformation genutzt, d.h. die Messung der Amplitude der an der Bohrlochwand reflektierten Wellen.

Zusätzlich zur Amplitude wird beim Televiwer auch die Laufzeit des reflektierten Signals gemessen. Kennt man die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in der Bohrspülung und im Öl im Inneren der Sonde, läßt sich aus der Laufzeitmessung ein sehr detailliertes Bohrlochcaliper bestimmen. Die aus einer Televiwermessung abgeleitete Bohrlochform ist in der Abbildung 6 als 3-dimensionales Gitternetz dargestellt. Der gleiche Bohrlochabschnitt ist aus drei verschiedenen - jeweils um 90° gedrehten - Blickwinkeln gezeigt. Messungen mit unserem Televiwer im Labor haben gezeigt, daß die Auflösung bei der Distanzmessung etwa 0,2 mm beträgt. Diese sehr präzisen Caliper-Messungen können z.B. genutzt werden zum Erkennen von Innenkorrosionen in der Verrohrung, zur Volumenberechnung, zur Beurteilung der Bohrlochstabilität und zur Bestimmung der Richtung des Spannungsfeldes aus der Richtung der Bohrlochrandausbrüche.

Die Meßpraxis hat gezeigt, daß die Qualität der Televiwerbilder sehr stark von der Qualität der Bohrung und von der Zentrierung der Sonde abhängt. Auf diese Problematik soll im folgenden näher eingegangen werden.

3 ZUR THEORIE DER ULTRASCHALLABTASTUNG

Das Meßprinzip des Televiwer besteht darin, mit einem rotierenden Schwinger während einer kontinuierlichen Meßfahrt die Bohrlochwand "punktweise" abzutasten. Pro Umdrehung werden 128 bis 512 Ultraschallimpulse ausgesendet. Gemessen wird jeweils die maximale Amplitude und die Laufzeit des an der Bohrlochwand reflektierten Signals.

Der klassische Televiwer, der erstmals 1965 nach einem Patent von Mobil Oil gebaut wurde, benutzt einen einzelnen Schwinger zur Erzeugung der akustischen Signale. Derselbe Schwinger dient auch zum Empfang der an der Bohrlochwand

reflektierten Wellen. Die Meßpraxis der letzten Jahre und auch systematische Laboruntersuchungen (Georgi, 1985) haben gezeigt, daß der Televier sehr informative und objektiv interpretierbare Ergebnisse liefert, wenn die Sonde in einem weitgehend kreisförmigen Bohrloch gut zentriert gefahren wird. Die gemessenen Amplituden sind dann ein Maß für die relativen Änderungen in der Reflektivität (Impedanz) entlang des Bohrlochs. Die reflektierte Amplitude einer vertikal auf die Bohrlochwand auftreffenden Welle ist proportional zum Reflexionskoeffizienten c zwischen der Bohrspülung und der Bohrlochwand:

$$c = \frac{Z_r - Z_b}{Z_r + Z_b} = \frac{\rho_r V_r - \rho_b V_b}{\rho_r V_r + \rho_b V_b}$$

- Z_b/Z_r = Impedanz der Bohrspülung und des Gesteins
- V_b/V_r = Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Wellen in der Bohrspülung und im Gestein
- ρ_b/ρ_r = Dichte der Bohrspülung und des Gesteins

Unterhalb des kritischen Winkels, ändert sich der Reflexionskoeffizient nur wenig in Abhängigkeit vom Einfallswinkel.

Nehmen wir für die Bohrspülung klares Wasser mit $V_b = 1500$ m/s, $\rho_b = 1$ gr/cm³ an, für ein Gestein mit hoher Impedanz $V_h = 6000$ m/s, $\rho_h = 3,0$ gr/cm³ an, und für ein Gestein mit niedriger Impedanz $V_n = 1500$ m/s, $\rho_n = 1,5$ gr/cm³, so ergibt für das Verhältnis der an den beiden Gesteinen reflektierten Amplituden:

$$\frac{A_h}{A_n} = 4,2.$$

Da die beobachteten Amplitudenvariationen wesentlich größer sind, können sie durch die unterschiedliche Impedanz der Gesteine allein nicht erklärt werden. Eine Erniedrigung der Amplituden ist dort zu erwarten, wo die Wellen an den Kanten von Ausbruchszonen diffraktiert werden. Wie Messungen im Feld und im Labor gezeigt haben, treten erhebliche Amplitu-

denvariationen auf in Abhängigkeit von der Position der Sonde in der Bohrung. Durch den starken Einfluß dieser sekundären Effekte erhält man in Abhängigkeit vom Zustand der Bohrlochwand akustische Bilder sehr unterschiedlicher Qualität und eine quantitative Analyse der Bilddaten ist vielfach nicht möglich. Im folgenden soll die starke Abhängigkeit der Amplituden von der Meßgeometrie durch theoretische Berechnungen und Beispiele von Labormessungen erläutert und Ansätze zur Verbesserung des Meßprinzips dargestellt werden. Zur Erzeugung der akustischen Wellen wird beim Televiever ein piezoelektrischer Schwinger benutzt, der die Form einer kreisrunden Scheibe hat. Durch einen elektrischen Impuls wird die Scheibe zu einer Dickenschwingung angeregt. Die zur Hauptfrequenz der abgestrahlten Wellen gehörende Wellenlänge ist bei Televiever-Systemen typischerweise 5-10mal kleiner als der Durchmesser des piezoelektrischen Schwingers. Die Abstrahlcharakteristik eines solchen Schwingers kann berechnet werden, wenn man sich entsprechend dem Huygen'schen Prinzip auf der Oberfläche der Scheibe eine Vielzahl von Punktquellen mit geeigneter Amplitude und Phase verteilt denkt.

Für die Abstrahlung einer kontinuierlichen Sinuswelle beträgt die Verschiebung u an einem Beobachtungspunkt x_i, y_i

$$U_i(x_i, y_i) = \frac{1}{j\lambda} \iint_D U_t(x_t, y_t) \frac{1}{R} e^{jkR} \cos\phi \, dx_t \, dy_t \quad (1)$$

Die Beobachtungsebene x_i, y_i soll dabei parallel zur Oberfläche der Schwingerscheibe liegen. Der Ausdruck $u_t(x_t, y_t)$ beschreibt die Verschiebungen auf der Oberfläche des Schwingers. Durch R wird die Entfernung zwischen Punktquelle und Beobachtungspunkt angegeben. Der Winkel zwischen der Richtung von R und der Normalen auf der Schwingeroberfläche ist als ϕ bezeichnet. Benutzt man die Fresnelsche Aproximation für die Lösung des Fernfeldes so läßt sich zeigen, daß die Abstrahlcharakteristik $u_i(x_i, y_i)$ durch die Fourier-Transform der Amplitudenverteilung $u_t(x_t, y_t)$ entlang der Oberfläche des Schwingers beschrieben werden kann (Castleman, 1984).

Unter der vereinfachten Annahme einer konstanten Verschiebungsamplitude auf der Schwingeroberfläche ergibt sich für die Abstrahlcharakteristik in einer Ebene x_i, y_i , die sich in einer Entfernung d_i vom Schwinger befindet:

$$U(x_i, y_i) = 2 \left| \frac{J_1(\pi r/r_0)}{\pi r/r_0} \right| \quad (2)$$

J_1 ist die Besselfunktion

$$r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad r_0 = \frac{\lambda d_i}{a}$$

λ ist die Wellenlänge der abgestrahlten Sinuswelle und a ist der Durchmesser des piezoelektrischen Schwingers.

Definiert man den Durchmesser W der in der Fläche x_i, y_i beleuchteten kreisförmigen Zone durch die -20 dB Linie, so ergibt sich folgende Näherungsformel:

$$W \approx 1,2 r_0 = 1,2 \lambda d_i / a \quad (3)$$

Für einen kreisförmigen Schwinger mit einem Durchmesser von 50 mm zeigt die Abbildung 7 die nach der Formel (1) berechnete Verteilung der Amplituden der akustischen Welle in einer Ebene, die 100 mm vom Schwinger entfernt ist. Für die Wellenlänge des abgestrahlten Signals wurde bei der Berechnung ein Wert $\lambda = 1$ mm angenommen. Dies entspricht im Wasser einer Frequenz von 1,5 MHz, der Hauptfrequenz heutiger Teviewersysteme. Wie die Abbildung 7 zeigt, läßt sich theoretisch mit einem Einzelschwinger eine sehr starke Bündelung der akustischen Energie erzielen. Die Näherungsformel (3) zeigt aber auch, daß der Durchmesser der beleuchteten Zone mit der Entfernung dieser Zone vom Schwinger linear größer wird. Nach der Näherungsformel (3) beträgt der Öffnungswinkel des akustischen Strahles bei einem Durchmesser des Schwingers von 20 mm und einer abgestrahlten Frequenz von 1,5 MHz etwa $3,8^\circ$. In der Praxis heutiger Teviewersysteme werden Öffnungswinkel von etwa 5° bis 6° erreicht. Bei einem Bohrlochdurchmesser von 150

mm beträgt für einen Televiever mit einem 1,4 MHz Schwinger der Durchmesser der vom akustischen Strahl beleuchteten, kreisförmigen Fläche etwa 8 mm bis 10 mm. Von dieser Fläche wird ein Signal reflektiert, das sich aus der Überlagerung von Wellen ergibt, die von über die Fläche verteilten Punktquellen mit geeigneter Amplitude und Phase ausgesendet werden.

Will man das Meßprinzip des Televievers verbessern und größere Flexibilität beim Meßeinsatz erreichen, so ist es sinnvoll, eine größere Zahl von Einzelschwingern (Punktquellen) bei der Anregung und beim Empfang des Wellenfeldes zu verwenden. Hierdurch wird es möglich, die akustische Energie sowohl in der Richtung wie auch in der Entfernung zu fokussieren. Durch numerische Berechnungen, die auf dem Huygen'schen Prinzip beruhen, kann für beliebige Anregungsfunktionen und beliebige Geometrien der Schwinger und des Bohrloches die Abstrahlcharakteristik der Schwinger und das an der Bohrlochwand reflektierte Wellenfeld berechnet werden.

4 THEORETISCHE BERECHNUNG ZUR WELLENAUSBREITUNG

Um die Wirkung der Fokussierung bei einem Array aus mehreren Schwingern richtig beurteilen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie die Amplitudenverteilung des von der Televiever-Sonde ausgesandten Signals aussieht. So wurde ein in FORTRAN 77 geschriebenes Programmpaket entwickelt, welches es ermöglicht, die theoretische maximale Amplitude für die Punkte eines in Dimension und Koordinaten frei wählbaren Gitternetzes zu bestimmen. Dadurch sollen Aussagen z.B. über die theoretische Strahlbreite bei verschiedener Wahl der Fokussierungsparameter (z.B. Verzögerungszeiten) ermöglicht werden.

Es wird nun der Berechnungsweg für die theoretische Maximalamplitude eines beliebigen Punktes P im Gitternetz aufgezeigt (Abb. 8). Nach dem Huygen'schen Prinzip setzt sich das Ge-

sämtesignal am Punkt P zusammen aus der phasenrichtigen Überlagerung der von den einzelnen Schwingern kommenden Signale. Um diese Signale phasenrichtig addieren zu können, ist es also notwendig, den Phasenunterschied zwischen den einzelnen Signalen zu berechnen.

Dazu wird der Abstand d_i für jeden Schwinger zum Punkt P berechnet. Nimmt man eine konstante Signalausbreitungsgeschwindigkeit c an, so legt das Signal diesen Weg in der Zeit

$$t_i = d_i/c$$

zurück.

Zu dem Signal des Schwingers mit der kürzesten Laufzeit werden nun alle übrigen Signale zeitrichtig, also auch phasenrichtig addiert. So wird für jeden Punkt des vorgegebenen Gitternetzes der Wellenzug in Abhängigkeit von der Zeit berechnet und aus diesem Wellenzug die Maximalamplitude ermittelt.

Zur Berechnung der Amplitudenverteilung können unterschiedliche Signalformen benutzt werden. Entweder wird die Signalform mittels des Programmpaketes theoretisch berechnet. Dabei lassen sich Angaben wie die Mittenfrequenz und Bandbreite variieren. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, digitalisierte Daten eines gemessenen Signals zur Berechnung der Amplitudenverteilung zu verwenden.

Durch diese Eingabemöglichkeiten läßt sich der Einfluß verschiedener Schwingersignale auf die theoretische Amplitudenverteilung untersuchen.

Die Darstellung der berechneten Werte erfolgt auf verschiedene Art und Weisen. In Abbildung 9 ist die Amplitudenverteilung als zweidimensionaler Isolinenplot dargestellt, wobei Bereiche unterschiedlicher Maximalamplitude durch verschiedene Schattierung besser kenntlich gemacht sind. Eine weitere

Darstellungsart ist der Linienplot wie z.B. in Abbildung 10. Hier sind die Maximalamplitudenwerte in Abhängigkeit von den x-Koordinaten gezeichnet.

5 KORREKTUR DES AMPLITUDENBILDES

Ein Ergebnis theoretischer Berechnungen für eine nicht zentrierte Televiewersonde in einem kreisrunden Bohrloch ist in vereinfachter Form in Abbildung 11 dargestellt. Der vom Schwinger ausgehende Strahl trifft nicht senkrecht auf die Bohrlochwand. Der größte Teil der gebündelt zurückgeworfenen Energie gelangt nicht zum Schwinger. Vom Schwinger empfangen wird ein Teil des diffraktierten Wellenfeldes, dessen Amplituden davon abhängen, in welcher Position relativ zum Hauptmaximum der Abstrahlcharakteristik der reflektierenden Fläche sich der Schwinger befindet.

Der in Abbildung 11 dargestellte Meßeffect tritt auch bei gut zentrierter Sonde auf, wenn z.B. durch Ausbrüche in der Bohrlochwand ein unregelmäßiger Bohrlochquerschnitt entsteht.

Die Abbildung 12 zeigt einen kurzen Ausschnitt aus einer Televiewermessung, wobei der Umfang der Bohrlochwand zweimal abgerollt in horizontaler Richtung dargestellt ist. Dunkle Töne entsprechen kleinen Amplituden, helle Töne hohen Amplituden. Durch niedrigere Impedanzen im Bereich von Klüften und durch kleine Ausbrüche in der Bohrlochwand entlang von Klüften, treten Klüfte im Gestein als dunkle Linien im Amplitudenbild in Erscheinung. Eine schräg zur Bohrlochachse verlaufende Kluftfläche wird - wie in Abbildung 2 erläutert - in eine Sinuskurve abgebildet. Aus der Phase der Sinuskurve läßt sich die Streichrichtung und aus ihrer Amplitude das Einfallen der Fläche bestimmen. In der Abbildung 12 sind geringe Amplitudenvariationen in vorwiegend horizontaler Richtung sichtbar, die eine Wellenlänge haben, die etwa dem halben Bohrlochumfang entspricht. Diese Amplitudenvariationen sind auf eine

leichte Dezentrierung der Sonde und auf einen etwas unregelmäßigen Querschnitt zurückzuführen. Daneben sind gerade, vertikal verlaufende, dunkle Streifen sichtbar. Die niedrigen Amplituden sind hier durch Riefen in der Bohrlochwand verursacht, die beim Ein- und Ausfahren des Bohrgestänges entstanden sind. In der Abbildung 13 ist das Amplitudenbild der Abbildung 12 nach einer Datenbearbeitung dargestellt, mit der versucht wurde, die durch die Bohrlochform und die Meßgeometrie hervorgerufenen Effekte zu korrigieren. Deutlich sichtbar sind einige fast vertikal verlaufende Klüfte zu erkennen. Außerdem tritt in der Abbildung 13 die Gesteinstextur hervor.

Sehr große Amplitudenvariationen entlang des Bohrlochumfanges, verursacht durch Dezentrierung der Sonde, sind im linken Teil der Abbildung 14 zu beobachten. Die maximalen Amplituden sind etwa 30mal größer als die minimalen Amplituden, obwohl das kreisrunde Bohrloch hier einen kompakten Sandstein durchteuft. Unter der Annahme eines einheitlichen Gesteins im Bereich der Messung konnte eine Datenbearbeitung erfolgreich durchgeführt werden, deren Ergebnis im rechten Teil der Abbildung 14 dargestellt ist: eine feine Kluft läßt sich durchgehend erkennen. Eine solche Rekonstruktion des akustischen Abbildes der Bohrlochwand läßt sich aber nur durchführen, wenn sich nicht gleichzeitig Effekte von Gesteinswechsel, Dezentrierung, Bohrlochwandausbrüchen und Rauigkeit der Bohrlochwand überlagern. Die Möglichkeiten einer nachträglichen Datenbearbeitung werden weiterhin eingeschränkt durch die begrenzte Dynamik der Teviewermesssysteme, die in günstigen Fällen etwa 40 dB beträgt.

Unabhängig vom Zustand des Bohrloches können erhebliche Verschlechterungen der Bildqualität auftreten, wenn die akustischen Wellen in der Bohrspülung stark gedämpft werden. Solche Dämpfungen werden im allgemeinen durch Streuung der akustischen Wellen an Partikeln in der Bohrspülung verursacht, die in der Größenordnung der Wellenlänge der akustischen Wellen sind (1 mm).

6 KORREKTUR DES LAUFZEITBILDES

Ein häufiges Problem bei der Auswertung von Televiewer-Daten ist die Tatsache, daß sich die Sonde während der Messung oft außerhalb des geometrischen Mittelpunktes des Bohrlochs befindet. Dadurch treten besonders im Amplitudenbild schwarze Streifen auf, die Bereiche mit niedrigen Amplituden darstellen (Abb. 14). Sie rühren davon her, daß in diesen Bereichen der von Televiewer ausgesandte Schallstrahl nicht in sich zurück reflektiert wird, weil er nicht senkrecht die Bohrlochwand trifft. Geht man davon aus, daß der Schallstrahl eine endliche Strahlbreite hat, wird die Sonde in diesen Bereichen durch den reflektierten Strahl gar nicht oder nur teilweise getroffen (Abb. 11).

Eine wichtige Aufgabe ist es also, die Dezentrierung der Sonde, das heißt den Abstand Sondenachse - Mittelpunkt Bohrloch zu berechnen, um die Hilfe dieser Daten z.B. eine Korrektur der Amplitudenwerte vornehmen zu können.

Beim Televiewer wird neben der Amplitude des reflektierten Signals auch die Laufzeit, welche das vom Televiewer ausgesandte Signal für den Weg Sonde-Bohrlochwand-Sonde braucht, gemessen und abgespeichert. Setzt man eine konstante Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_s innerhalb der Bohrspülung des Schallstrahls voraus, so ist die gemessene Laufzeit direkt proportional zu der Distanz Sonde-Bohrlochwand-Sonde:

$$t = s/c_s$$

$$d = 0.5*t*c_s \quad \text{mit } d = 0.5*s$$

t: Laufzeit

s: Distanz Sonde-Bohrlochwand-Sonde

d: Distanz Sonde-Bohrlochwand

Ein idealisiertes Bohrloch habe einen kreisförmigen Querschnitt. Folglich müssen die Laufzeitwerte, dargestellt im kartesischen Koordinatensystem, bei dem die Sondenachse durch den Ursprung M geht, auf einem Kreis liegen (Abb. 15), welcher um den Betrag der Dezentrierung der Sonde relativ zum Bohrlochmittelpunkt M verschoben ist.

Die Kreisgleichung für diesen Kreis hat die folgende Form:

$$(y_g - y_o)^2 + (x_g - x_o)^2 = t_w^2 \quad (4)$$

mit $x_g^2 + y_g^2 = t_g^2$

- t_w : Laufzeit der zentrierten Sonde
- t_g : gemessene Laufzeit der dezentralisierten Sonde
- x_o, y_o : Werte der Dezentrierung

Und es gilt:

$$\begin{aligned} x_w &= x_g - x_o \\ y_w &= y_g - y_o \\ t_w &= x_w + y_w \end{aligned}$$

Der Querschnitt eines realen Bohrloches unterscheidet sich vom idealisierten durch eine gewisse Elliptizität des Loches z.B. durch äußere mechanische Spannungen und Ausbruchszonen. Die Laufzeitmeßwerte werden außerdem durch statistische Meßfehler beeinflusst.

Um reale Laufzeit-Meßwerte auswerten zu können, wird nun eine Ausgleichsrechnung durchgeführt, wobei die Summe der Abweichungsquadrate Q der Meßwertordinaten von den Ordinaten des idealen Kreises ein Minimum ergeben sollen.

$$Q = \sum (y_w - y_g)^2 = \text{Min} \quad (5)$$

Gleichung (4) wird umgeformt wie folgt:

$$\begin{aligned} (y_g + x_g - t_w)^2 &= (-x_o - y_o)^2 + 2x_o x_g + 2y_o y_g \\ &= a_1 + a_2 x_g + a_3 y_g \end{aligned} \quad (6)$$

Gleichung (5) wird erfüllt, wenn folgende Bedingungen gelten:

- 1) $\delta Q / \delta a_1 = 2 \Sigma (\bar{y}_w - y_g)^2 * 1 = 0$
- 2) $\delta Q / \delta a_2 = 2 \Sigma (\bar{y}_w - y_g)^2 * x_g = 0$
- 3) $\delta Q / \delta a_3 = 2 \Sigma (\bar{y}_w - y_g)^2 * y_g = 0$

Aus Gleichung (6) folgt nun:

- a) $[(y_g + x_g - t_w)^2] = [a_1 * N] + [a_2 * x_g] + [a_3 * y_g]$
- b) $[(y_g + x_g - t_w)^2 * x_g] = [a_1 * x_g] + [a_2 * x_g^2] + [a_3 * x_g y_g]$
- c) $[(y_g + x_g - t_w)^2 * y_g] = [a_1 * y_g] + [a_2 * x_g y_g] + [a_3 * y_g^2]$

mit N : Anzahl der Meßwerte

[] : übliche Gaußsche Abkürzung
der Summen.

Dieses Gleichungssystem kann z.B. durch das Gaußsche Verfahren gelöst werden und dadurch erhält man die Dezentrierungswerte nach folgenden Gleichungen:

$$x_o = 0.5 * a_2$$

$$y_o = 0.5 * a_3$$

Aufgrund dieses statistischen Lösungssatzes ist es also möglich, aus realen Laufzeitwerten die Dezentrierung der Sonde vom Bohrlochmittelpunkt zu bestimmen, wobei bei diesem Ansatz ein Sollwert der Laufzeit, welche die zentrierte Sonde messen würde, vorgegeben wird.

Sinnvoll ist es, diejenige Laufzeit vorzugeben, die dem Bohrkaliber des Loches entspricht.

Dieser statistische Ansatz hat den großen Vorteil, daß zum Berechnen der Dezentrierungswerte x_0 , y_0 nicht alle Meßdaten einer Teufe, d.h. alle Meßwerte einer Umdrehung, notwendig sind. Durch eine Datenvorverarbeitung wird man also nur diejenigen Laufzeitwerte für die Ausgleichsrechnung zulassen, die relativ nahe zum Kreis des idealen Bohrlochs liegen. Oder, anders ausgedrückt, werden z.B. Meßwerte, die durch große Meßfehler bestimmt werden, nicht benutzt.

Die Daten werden nach folgenden Kriterien untersucht: Die Differenz zweier benachbarter Meßpunkte darf einen Schwellenwert nicht überschreiten. Damit wird verhindert, daß einzelne "Ausreißer", damit sind Meßwerte mit gegenüber den Nachbarwerten deutlich zu großer oder zu kleiner Laufzeit gemeint, in die Ausgleichsrechnung einfließen. Weiterhin werden auch diejenigen Laufzeiten aussortiert und nicht für die Ausgleichsrechnung zugelassen, welche um mehr als einen bestimmten vorgegebenen Betrag von den Soll-Laufzeiten abweichen.

Da nun nicht mehr alle Laufzeiten einer Umdrehung für die Ausgleichsrechnung benutzt werden, ist folgendes zu beachten:

Der Ausgleichsprozeß wird nur dann zufriedenstellend arbeiten, wenn die Laufzeitwerte aus verschiedenen Winkelbereichen der betrachteten Umdrehung stammen. Liegen sie alle in einem engen Winkelbereich, so ist der Fehler in der Bestimmung der Dezentrierung groß und die Ergebnisse somit unbrauchbar. Aus diesem Grund wurde eine minimale Anzahl der für den Ausgleichs-

prozeß notwendigen Meßwerte festgelegt, um sicherzustellen, daß eine ausreichende Verteilung der in den Ausgleichs-prozeß einfließenden Laufzeitwerte gegeben ist. Wird diese Anzahl unterschritten, so werden die Dezentrierungswerte der vorhergehenden Umdrehung auch für diese Umdrehung übernommen, da man davon ausgehen kann, daß sich die Dezentrierung nur relativ langsam und nur sehr wenig zwischen zwei benachbarten Teufen ändert.

Abb. 16 bis 21 zeigen die Graustufenbilder der korrigierten und nicht korrigierten Laufzeiten von Messungen, an denen das oben beschriebene Verfahren ausprobiert wurde. Deutlich erkennt man den Unterschied zwischen unbearbeiteten und bearbeiteten Daten: Die nicht bearbeiteten Laufzeitbilder zeigen mit ihren charakteristischen Streifen eine starke Dezentrierung der Sonde an. Dagegen sind bei den korrigierten Laufzeitwerten überall gleiche Werte festzustellen. Daran sieht man auch, daß der Querschnitt dieses Bohrlochs fast kreisförmig ist.

In Abb. 22 und 23 sind bearbeitete Laufzeitwerte aus einer anderen Bohrung dargestellt. Hier sieht man an den minimalen und maximalen Radien, daß der Querschnitt des Bohrlochs eine gewisse Elliptizität aufweist, denn trotz der Zentrierung sind noch eindeutige Laufzeitunterschiede festzustellen. Deutlich ist diese Tatsache aus Abb. 22 und 23, rechte Diagramme, abzulesen. Hier ist der maximale und der minimale Radius errechnet aus den Laufzeiten einer jeden Umdrehung dargestellt. In weiten Bereichen des Logs sind minimale und maximale Radien um einen fast gleichbleibenden Wert voneinander verschieden. Deutlich ist im Teufenbereich 1580 - 1582 m eine Ausbruchzone festzustellen, denn sowohl minimaler als auch maximaler Radius haben hier größere Werte als im übrigen Teil der Bohrung. Bei 1587 m nimmt die Elliptizität des Bohrlochs zu: Der minimale Radius bleibt auf dem gleichen Wert, der maximale Radius wächst an.

Neben dieser Darstellungsmöglichkeit wird erst durch die Zentrierung der Laufzeitdaten ein anderes Diagramm möglich (Abb. 24 und 25). Hier werden die N, E, S, W Laufzeitwerte als Kaliberlog benutzt: Bei 16 m und 29.5 m befinden sich Ausbruchszonen, die sich sehr deutlich von den übrigen, gleichbleibenden Werten abheben.

Abschließend kann festgestellt werden, daß die Zentrierung der Laufzeitdaten zu einer deutlichen Verbesserung der Datenqualität und Vielfältigkeit der Darstellungs- und Interpretationsmöglichkeiten verhilft. Dadurch, daß die Dezentrierung der Sonde vom Bohrlochmittelpunkt berechnet wird, ist nun die Möglichkeit einer Verbesserung des Amplitudenbildes gegeben. An der Realisierung dieser deterministischen Amplitudenkorrektur, die ganz wesentlich ist für eine quantitative Analyse der Amplitudendaten, wird zur Zeit noch gearbeitet.

7 MÖGLICHKEITEN ZUR VERBESSERUNG DES TELEVIEWER MESSPRINZIPS

Wegen der oben geschilderten Abhängigkeit der akustischen Bildqualität von einer ganzen Reihe von Faktoren, wurden Televiewermessungen vielfach überhaupt nicht durchgeführt oder sie haben zu enttäuschenden Ergebnissen gerade in den Bereichen geführt, in denen ein gutes akustisches Bild wesentlich zur Verbesserung der Interpretation der geophysikalischen Bohrlochmessungen hätte beitragen können. Eine bessere Akzeptanz von Televiewermessungen läßt sich nur erreichen, wenn auch unter ungünstigen Bedingungen eine hochauflösende Abbildung der Bohrlochwand rekonstruiert werden kann. Um diese Aufgabe optimal zu erfüllen, wäre es notwendig mit einer Punktquelle ein Wellenfeld zu erzeugen und mit ausreichend vielen punktförmigen Empfängern die an der Bohrlochwand reflektierten Wellen in ihrem zeitlichen Verlauf zu erfassen. Diese Messung müßte möglichst überlappend in alle Richtungen entlang des Bohrlochumfangs wiederholt werden. Durch Inversion des gemessenen Wellenfeldes (Migration) ließe

sich die Form des Bohrloches und die Verteilung der Impedanzen der Gesteine entlang des Bohrloches bestimmen. Aus technischen Gründen läßt sich ein solches Meßverfahren in der Praxis nicht einfach realisieren. Da eine ausreichende Auflösung Wellenlängen von 1 - 2 mm verlangen würde, dürfte eine akustische Punktquelle nur einen Durchmesser von 1 - 2 mm haben. Mit einem Schwinger dieser Größe könnte insbesondere bei stärker dämpfender Bohrspülung nicht genügend akustische Energie erzeugt werden. Ein weiteres technisches Problem stellen die bei einem solchen Meßverfahren anfallenden Datenmengen dar, die bei der Übertragung über heutige Bohrlochkabel zu sehr langsamen Meßgeschwindigkeiten führen würden. Eine "on-line"-Verarbeitung der Meßdaten in der Bohrlochsonde ist zwar denkbar, würde aber erhebliche Investitionen in ein spezielles Rechnersystem erfordern. Hält man aus technischen Gründen daran fest, pro Bildpunkt nur zwei Meßwerte (Amplitude und Laufzeit) zu erfassen, so läßt sich das Meßprinzip des Televiers verbessern, wenn man das akustische Wellenfeld nicht mit einem Einzelschwinger erzeugt, sondern mit einem akustischen Array, das aus einer Vielzahl von Punktquellen besteht. Die Größe und der Abstand der im akustischen Array verwendeten Einzelschwinger sollte in etwa der Hauptwellenlänge des abgestrahlten Signals entsprechen. In der Abbildung 26 ist ein akustisches Array mit 12 Einzelschwingern in einigem Abstand von einer Bohrlochwand eingezeichnet. Regt man die akustischen Signale in symmetrischer Weise von außen nach innen hin mit zunehmenden Verzögerungen an, so erreicht man eine Fokussierung der Energie entlang der y-Achse. Durch geeignete Wahl der Verzögerungen läßt sich zusätzlich eine variable Fokussierung in der x-Richtung erzielen. Es soll hier nur der ebene Fall betrachtet werden. Mit einem zweidimensionalen Array kann in gleicher Weise auch eine Fokussierung in der z-Richtung senkrecht zur Ebene x,y erreicht werden. Für die in der Abbildung 26 schraffiert dargestellte Fläche ist in der Abbildung 9 das Ergebnis einer theoretischen Berechnung des Wellenfeldes dargestellt.

Bei der Berechnung wurde ein akustisches Array mit 16 Elementen benutzt. Fokussiert wurde auf die Entfernung von 85 mm. Die Abbildung 9 zeigt als Isoliniendarstellung die relative Verteilung der Amplituden (dB) des akustischen Wellenfeldes. Auffallend ist der in x-Richtung langgestreckte Fokusbereich. Diese größere "Schärfentiefe" des Systems ist eher von Vorteil, da eine genaue Nachsteuerung der Fokuserntfernung nicht notwendig wird. Die genaue Entfernung zum Reflektor kann über die Laufzeitmessung ermittelt werden. In der Abbildung 10 ist die Amplitudenverteilung der Abbildung 9 für 4 Schnitte $y = \text{constant}$ dargestellt. Die gute Fokussierung in x-Richtung wird in dieser Abbildung besser sichtbar als in der Isoliniendarstellung.

Durch die Fokussierung der akustischen Energie ergeben sich folgende Möglichkeiten zur Verbesserung der Televiewermessung:

1. Die Auflösung des akustischen Bildes der Bohrlochwand wird verbessert.
2. Durch die Bündelung der Energie auf eine kleine Fläche der Bohrlochwand kann das Signal-Noise-Verhältnis verbessert werden.
3. Die genaue Lage der Fläche kann bestimmt werden, auch wenn nur eine Laufzeit gemessen wird.
4. Durch die Fokussierung wird an der Bohrlochwand eine sekundäre Punktquelle angeregt, deren Stärke durch den Impedanzunterschied zwischen Bohrspülung und Gestein bestimmt ist.

Die besondere Bedeutung des letzten Punktes soll in der Abbildung 27 erläutert werden. In einem Bohrloch ist ein ringförmiges akustisches Array eingezeichnet, das sich - ähnlich wie das Meßsystem in der Abbildung 11 - etwas außerhalb der Bohrlochmitte befindet. Das in geeigneter Weise von mehreren

Schwingern erzeugte Wellenfeld, beleuchtet auf der Bohrlochwand eine Fläche, deren Durchmesser etwa der Hauptwellenlänge des abgestrahlten Signals entsprechen soll. Von dem beleuchteten "Punkt" der Bohrlochwand wird Energie gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlt. Daher ist die vom akustischen Array empfangene, reflektierte Signalamplitude weitgehend unabhängig von der Position des Meßsystems im Bohrloch und von der Form des Bohrloches.

Im Auftrag des Instituts für Geophysik der WBK wurde ein Labormodell eines akustischen Arrays entwickelt, um die Möglichkeiten hochauflösender, akustischer Abtastungen der Bohrlochwand untersuchen zu können. Das kreisförmige Array besteht aus 128 Einzelschwingern, von denen bis zu 16 gemeinsam zur Anregung des Wellenfeldes benutzt werden können. Die Hauptwellenlänge des vom Einzelschwinger abgestrahlten Signals beträgt etwa 1,2 mm. Der akustische Strahl kann pro Umlauf in maximal 128 Richtungen messen. Ein Experiment, mit dem die Wirksamkeit der Fokussierung demonstriert werden kann, ist in der Abbildung 28 erläutert. Das akustische Array befindet sich in der Mitte eines kreisrunden Wasserbehälters. In unterschiedlichen Entfernungen vom Array wurde ein Eisenstab mit einem Durchmesser von 2 mm in den Wasserbehälter gehängt. Läuft nun der akustische Strahl um, so erhalten wir eine Amplitudenverteilung, die den in Abbildung 10 gezeigten Schnitten für eine konstante Entfernung y entsprechen. Die in ihrer Größe gleichbleibende Reflexion von der Wand des Wasserbehälters gibt die Möglichkeit zum Vergleich der relativen Amplitudenunterschiede.

Regt man das akustische Wellenfeld mit einem Einzelschwinger an, der den Durchmesser von 3 Hauptwellenlängen des abgestrahlten Signals hat, so erhält man das in Abbildung 29 dargestellte Ergebnis. Die Reflexionsamplituden vom Draht heben sich kaum von der Hintergrundinformation ab. Mit zunehmender Entfernung des Drahtes von der Quelle nehmen die Reflexionsamplituden ab. Das schlechte Auflösungsvermögen in horizontaler Richtung ist durch die Breite des akustischen Abbildes des

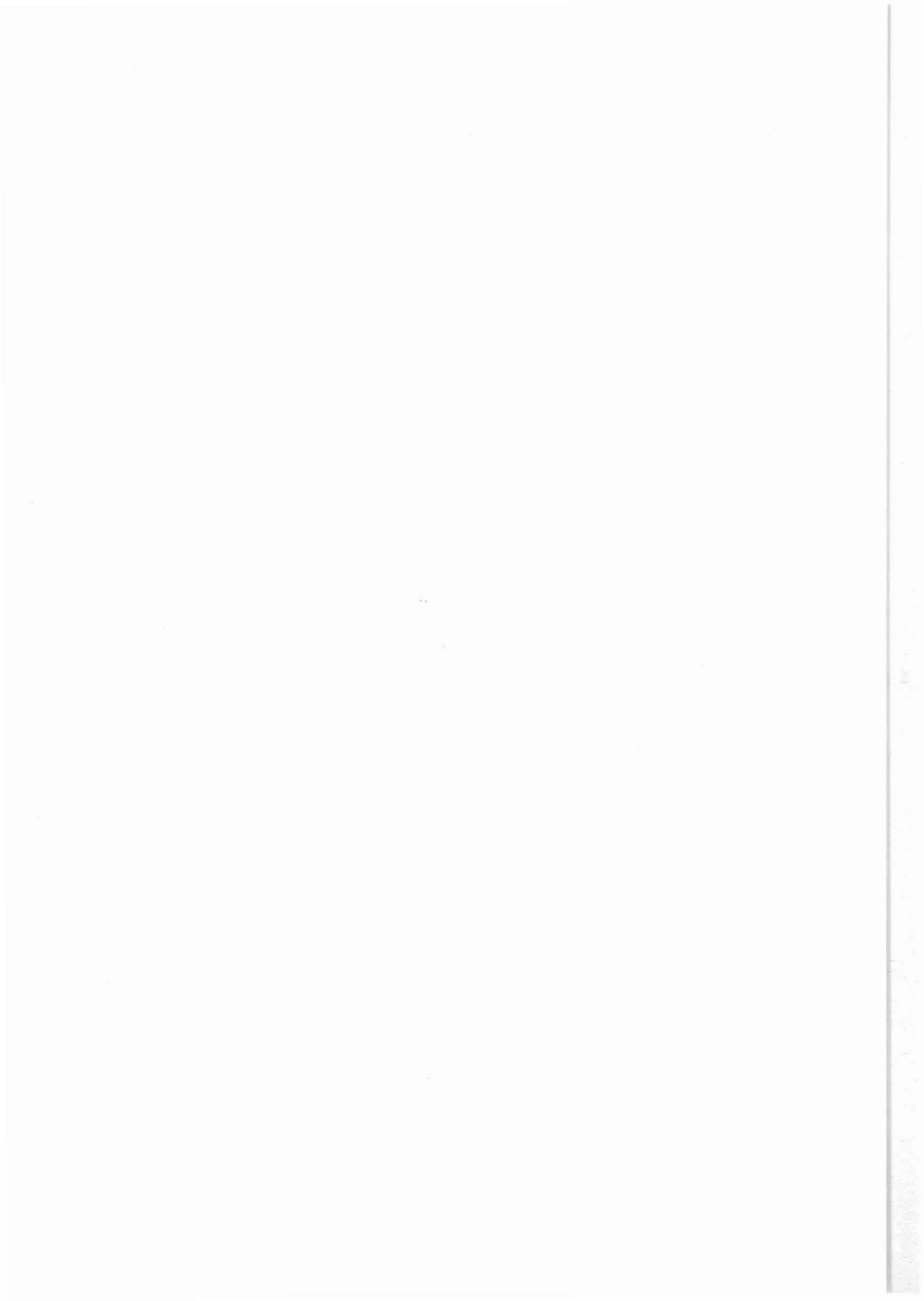
Drahtes gekennzeichnet. Fokussiert man den akustischen Strahl mit einem Array aus 16 Elementen auf eine Entfernung von 85 mm, erhält man das in Abbildung 30 dargestellte Ergebnis. Die erhebliche Verbesserung entspricht weitgehend der in Abbildung 10 dargestellten theoretischen Berechnung.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß durch die Fokussierung der akustischen Energie eine Verbesserung des Meßverfahrens mit folgenden Vorteilen erreicht wird:

1. Auch bei Erfassung nur eines Amplitudenwertes des reflektierenden Signals, wird die Auflösung des akustischen Bildes verbessert.
2. Die gemessenen Reflexionsamplituden hängen weniger stark von der Position des Meßsystems und von der Bohrlochform ab.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- Castlemann, K.R.: Digital Image Processing, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs - New Jersey, 1984
- Georgi, D.T. : Geometrical Aspects of Borehole Televier Images, SPWLA 26th Annual Logging Symposium, Dallas, June 1985
- Schepers, R. : Kartierung von Klüften mit Hilfe von Bohrlochmessungen, Tagungsband des 8. Mintrop Seminars, Kassel, 1988
- Simond, R. : Sondierungsbohrung Boettstein, Geophysics II: Sonic Televier, Technischer Bericht, NAGRA 1984



Anhang

(Abbildungen 1 - 30)

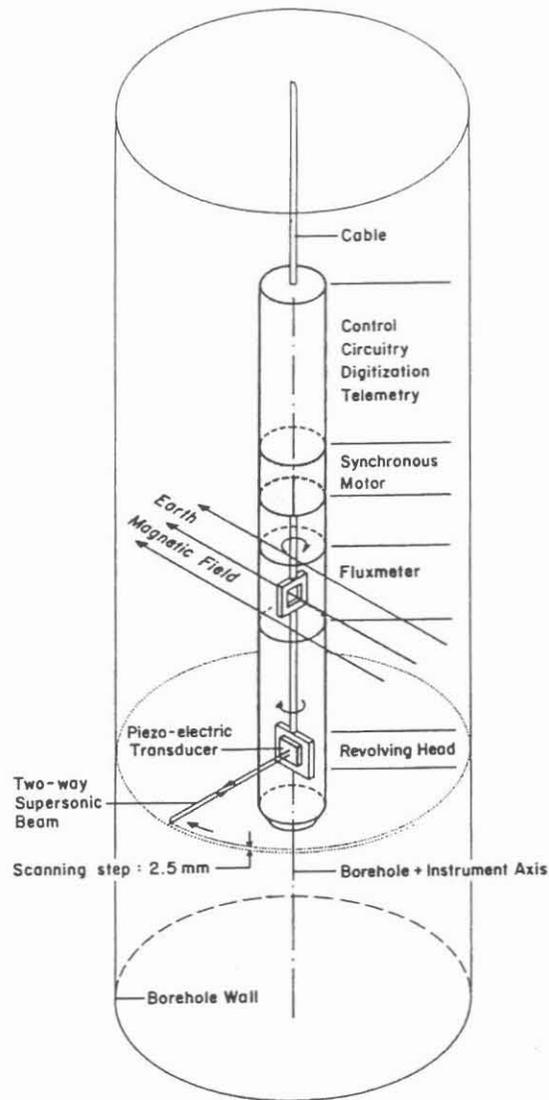


Abb. 1: Prinzip des digitalen Televiwer
(aus Simond 1984).

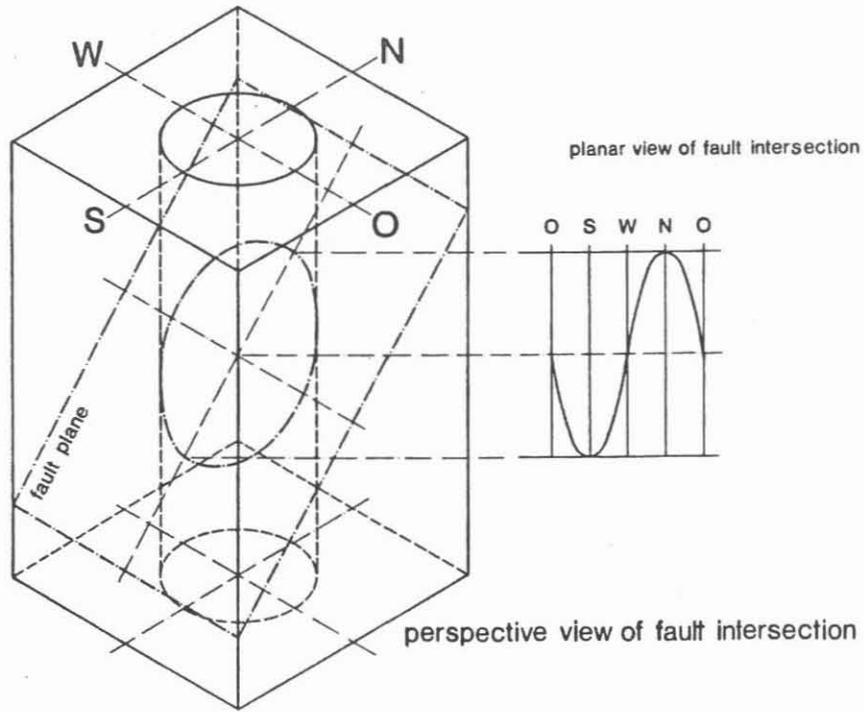


Abb. 2a: Abrollung eines Zylindermantels in einer Ebene.

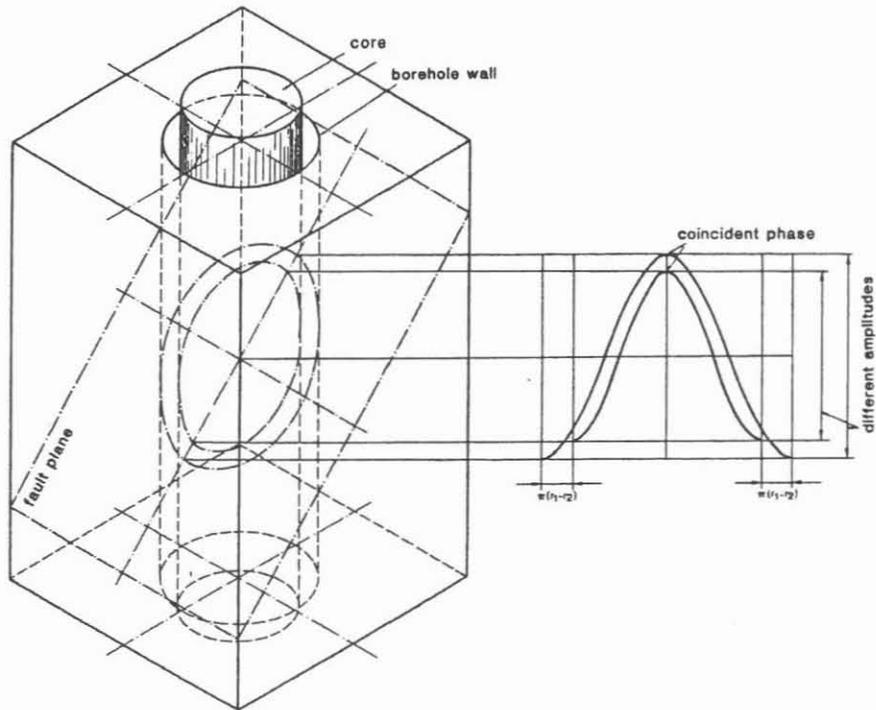


Abb. 2b: Unterschiede im Abbild einer Kluftfläche bei Abrollung des Kern und der Bohrlochwand.

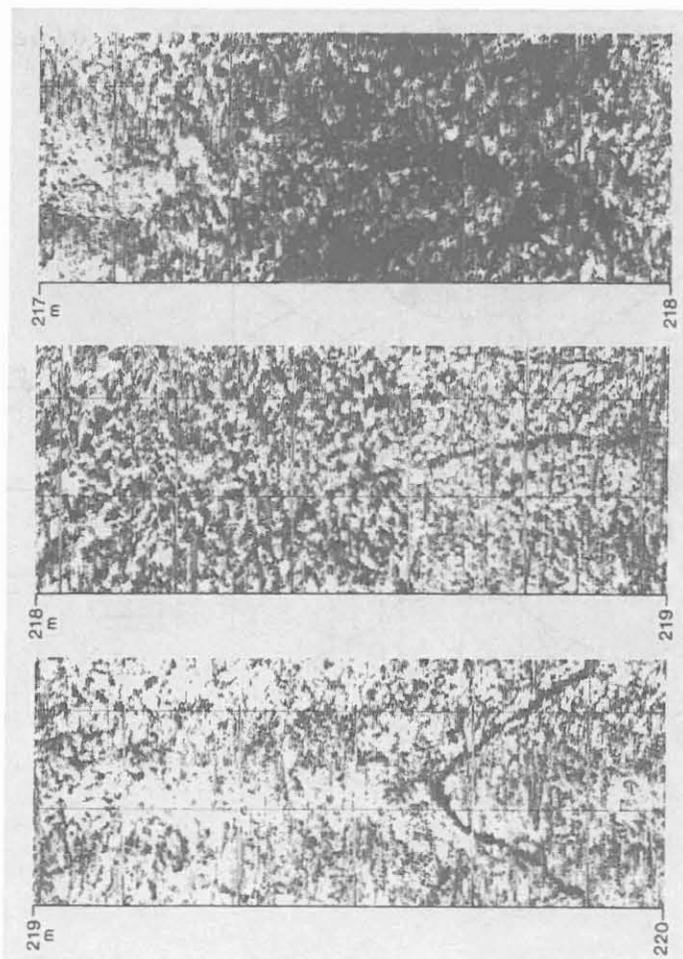
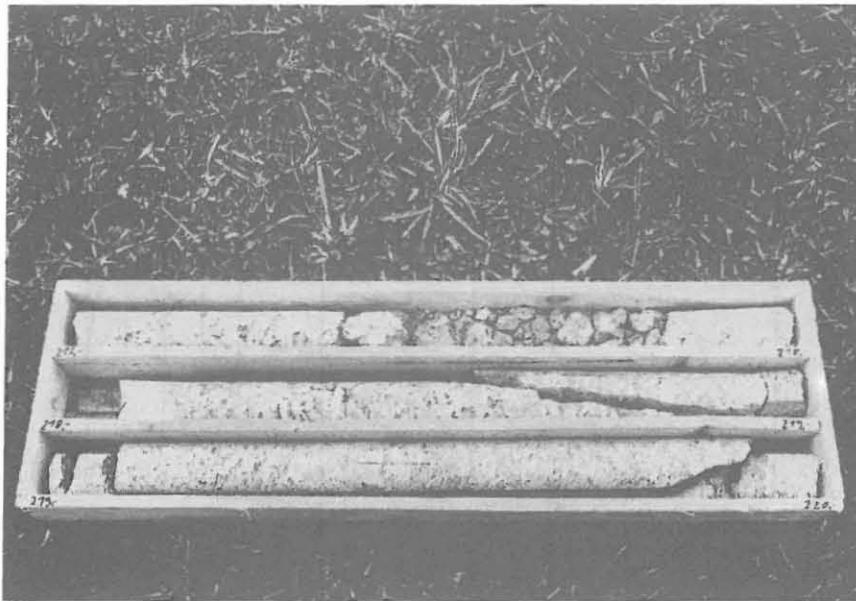


Abb. 3: Vergleich zwischen Kern und Televiever
Amplitudenbild aus einer Bohrung im Granit.

SYMBOL TABLE

 coal	 dirt with coal	 rooty bed
 shale	 fine grained silt	 sandstone
 plant fos.	 coarse grained silt	 iron carbon.
 non-marine fossils		

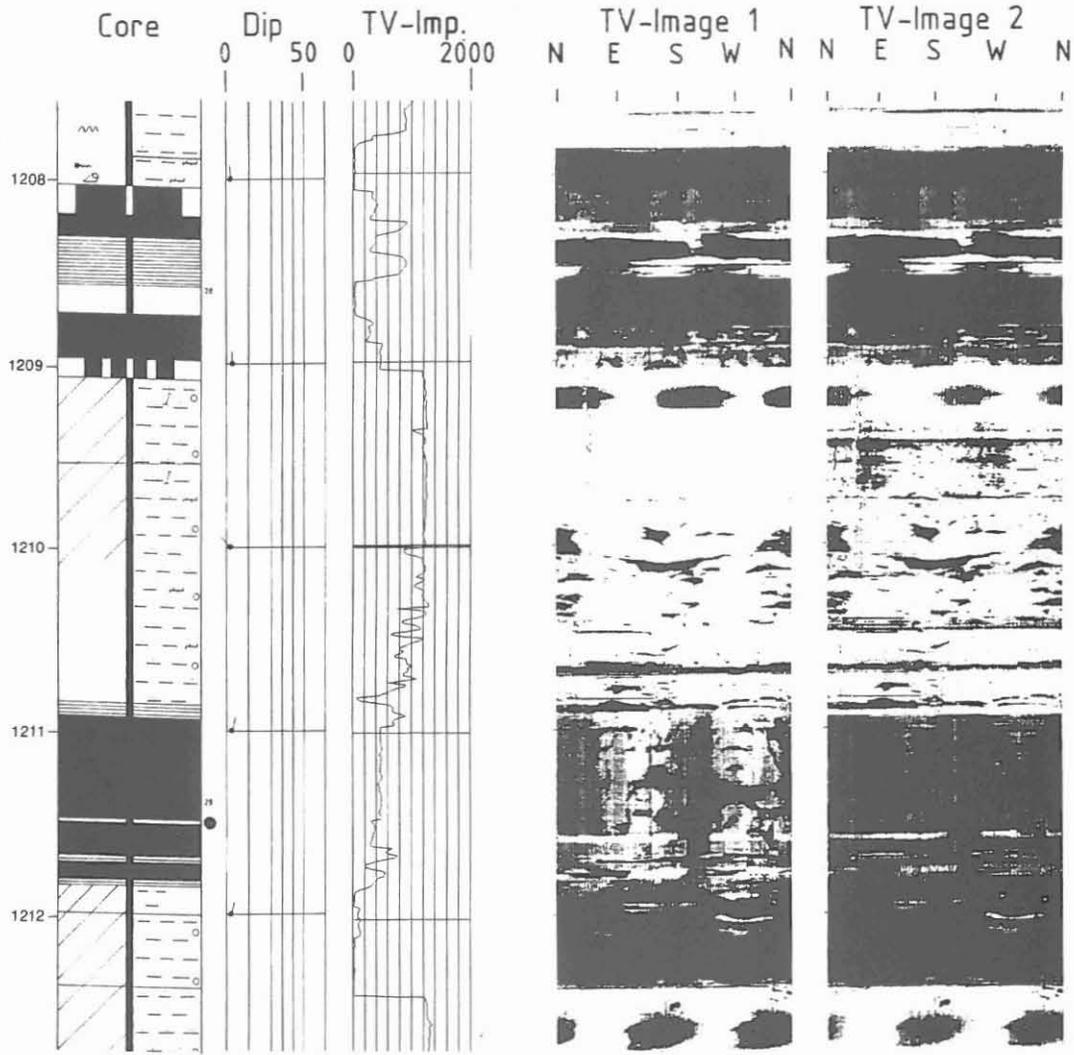


Abb. 4: Vergleich zwischen geologischer Kernbeschreibung und Televier Amplitudenbild aus einer Bohrung im flöz-führenden Karbon.

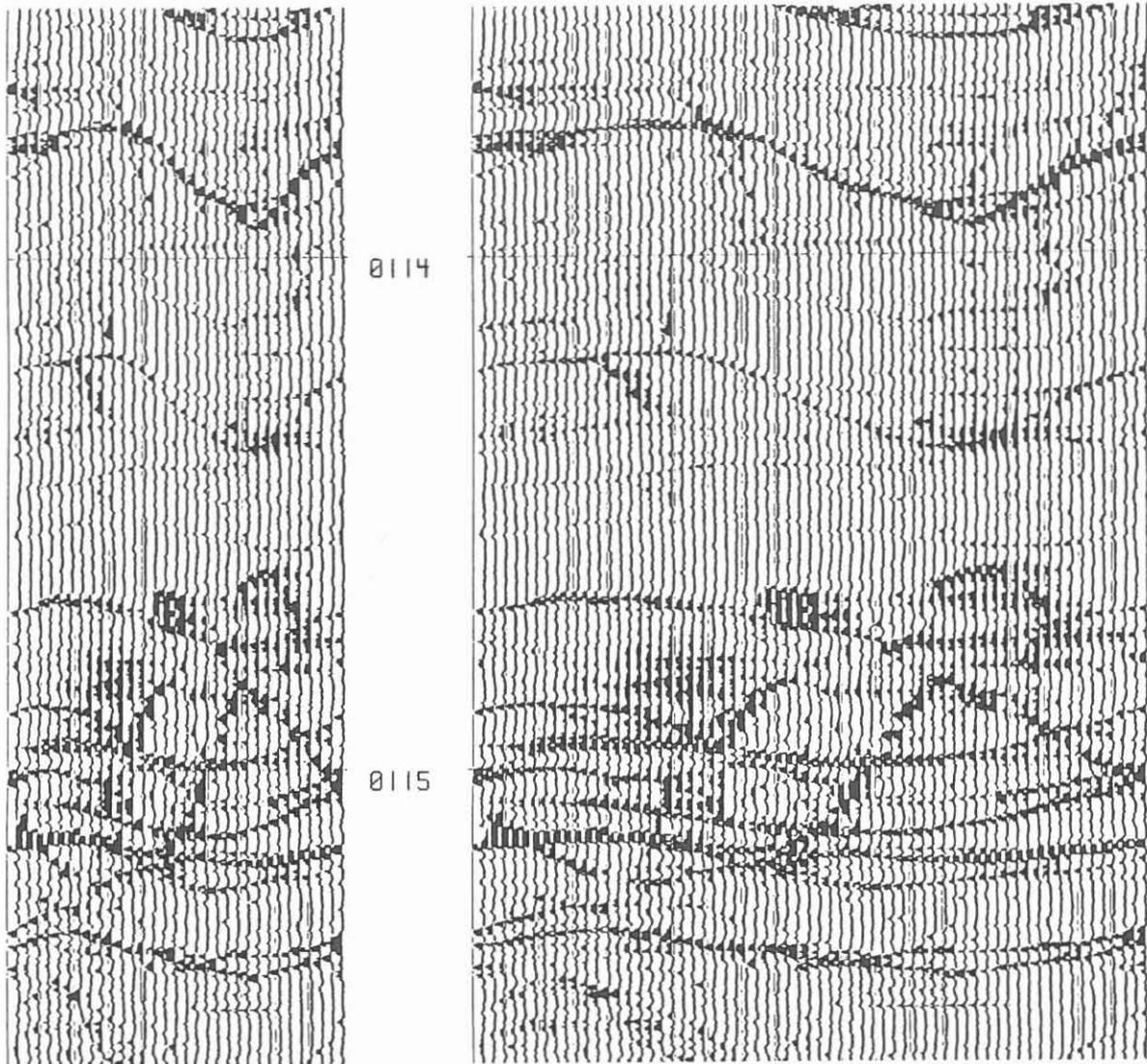


Abb. 5: Hochauflösendes akustisches Abbild eines komplexen Kluftsystems aus einer Bohrung im Gneis.

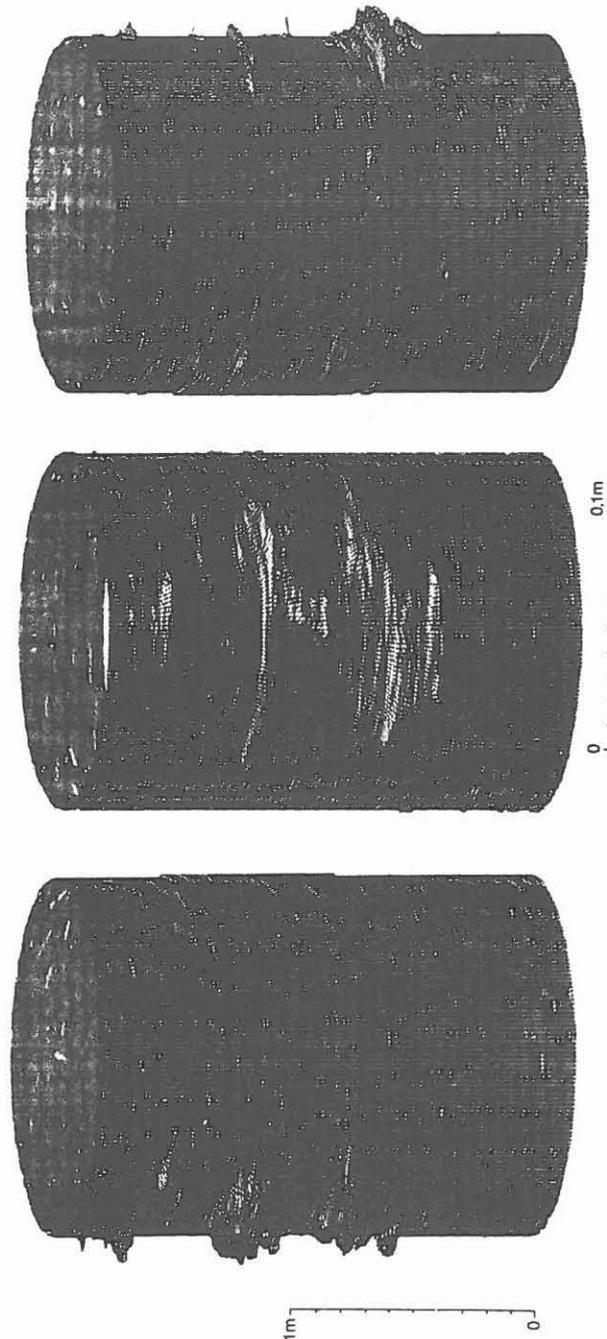


Abb. 6: Die 3-dimensionale Darstellung der Televiever Laufzeitmessung ergibt ein detailliertes Abbild der Bohrlochform (Caliper). Der gleiche Bohrlochabschnitt ist aus drei, um 90° versetzten Blickwinkeln gezeigt.

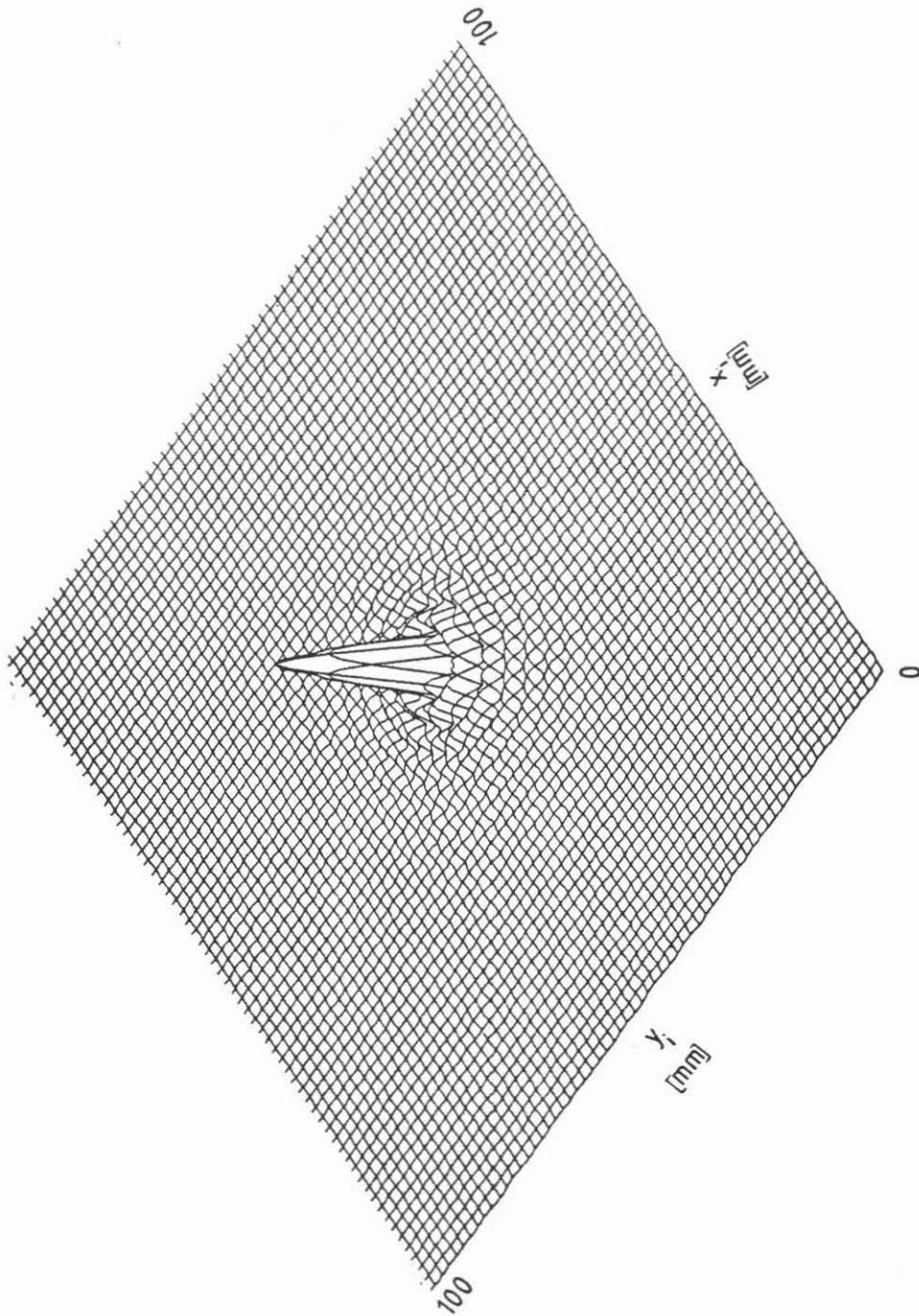


Abb. 7: P-Wellen Amplitudenverteilung in einer Ebene 100 mm von einem piezoelektrischen Schwinger mit einem Durchmesser von 50 mm.

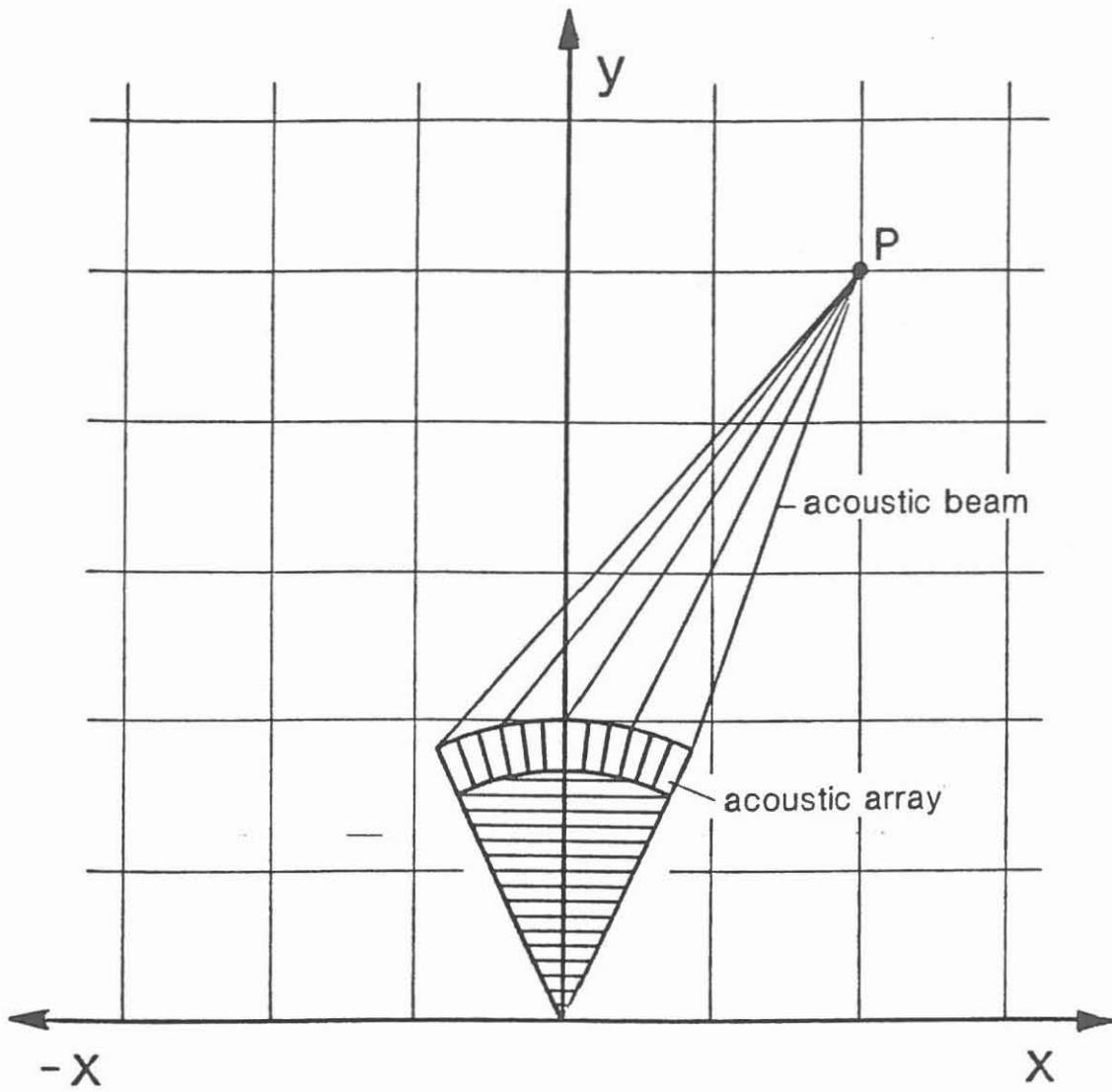


Abb. 8: Koordinatensystem für die theoretische Berechnung der Amplitudenverteilung akustischer Sendesysteme.

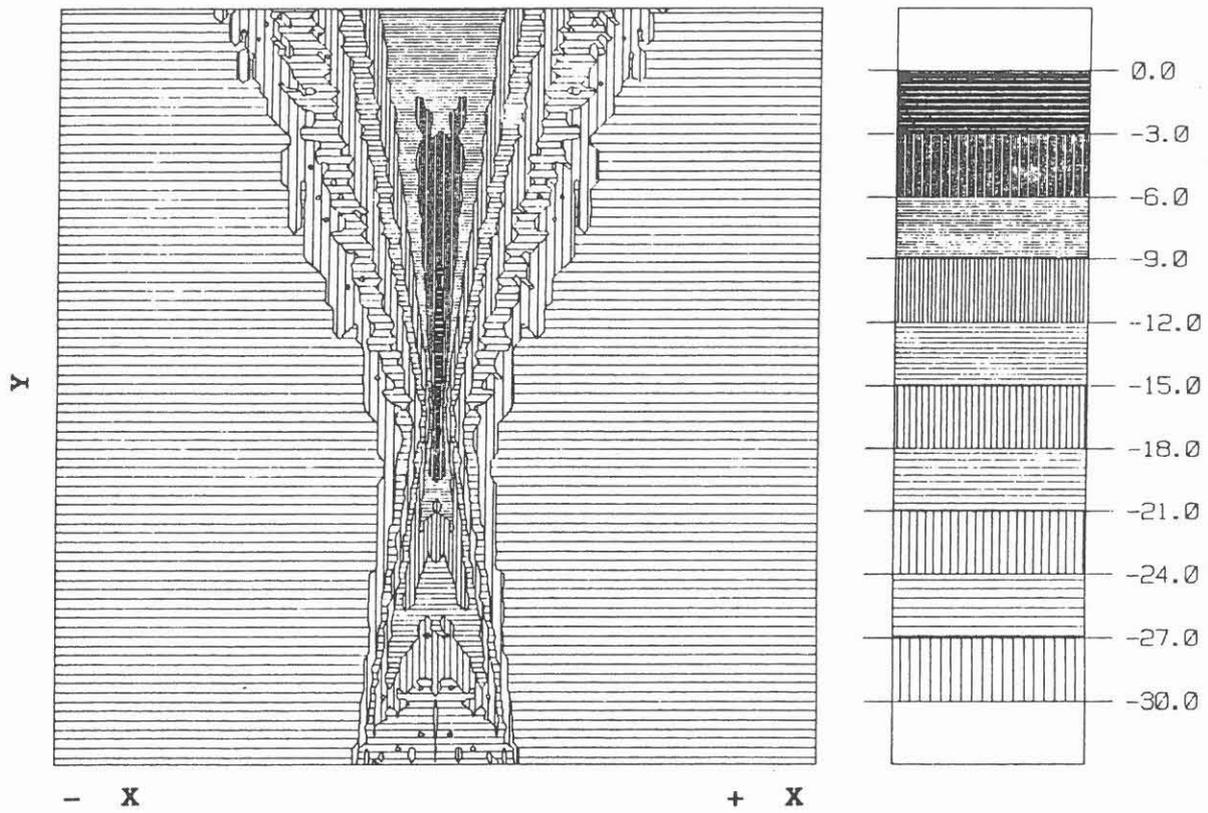


Abb. 9: Isoliniendarstellung einer Amplitudenverteilung, die durch 16 Einzelschwinger erzeugt wurde.

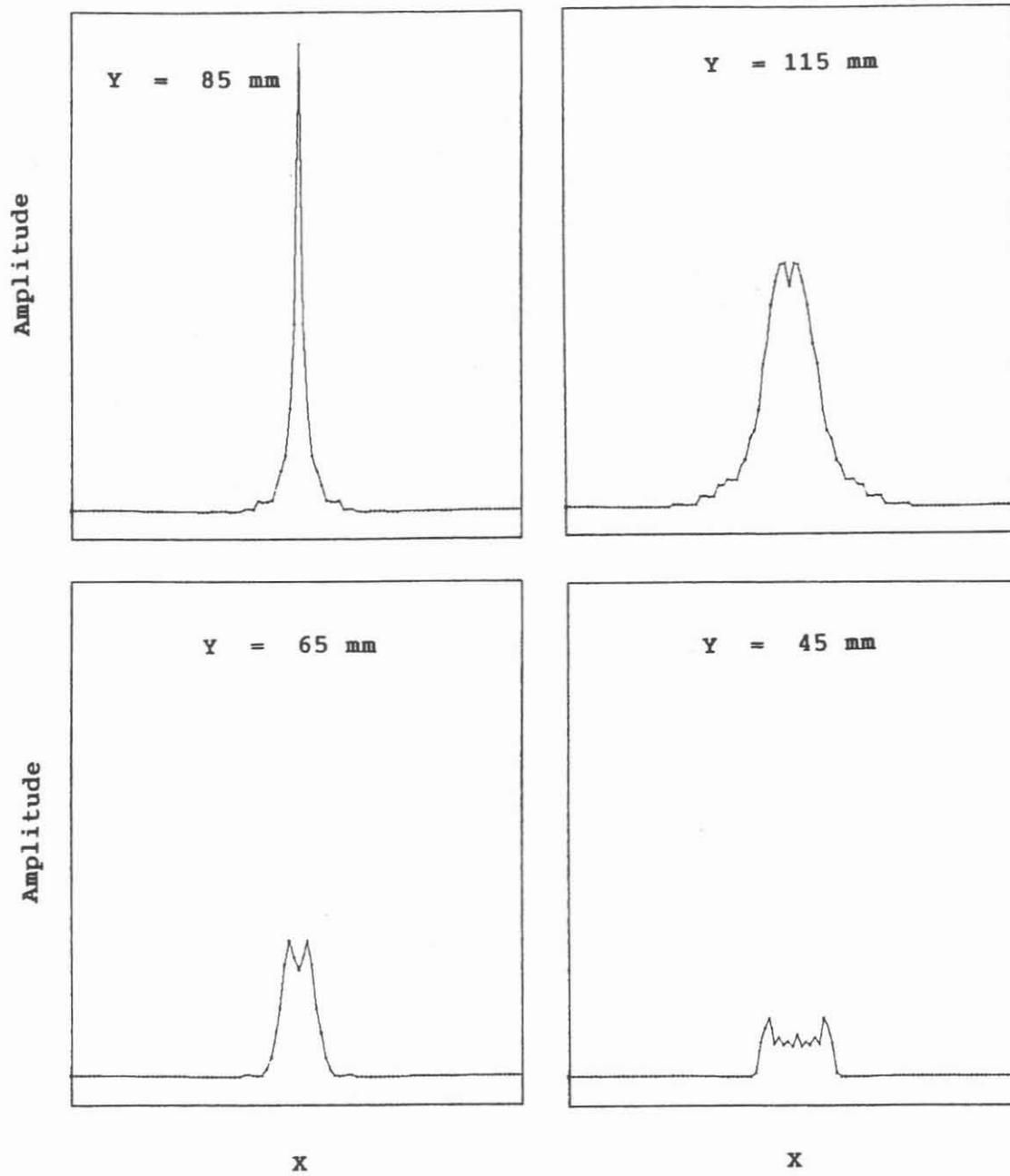


Abb. 10: Liniplot der Amplitudenverteilung der Abbildung 9 in verschiedenen Entfernungen.

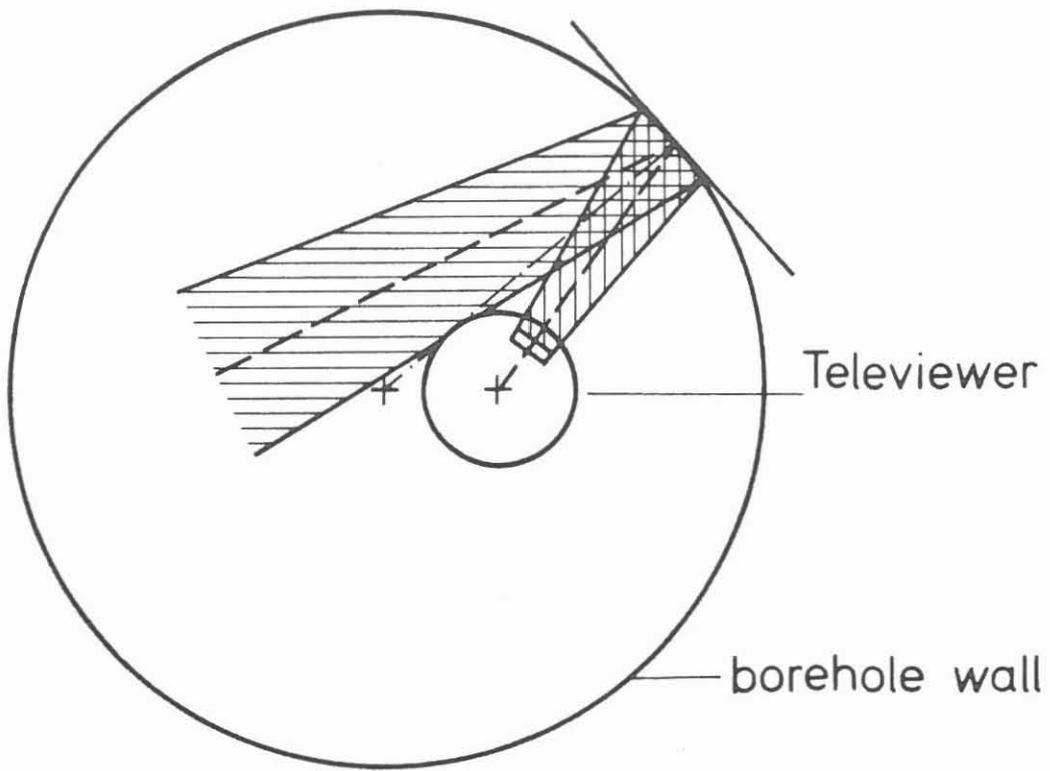


Abb. 11: Reflexion der akustischen Energie bei einer Televiwersonde außerhalb der Bohrlochmitte.

1798

1799

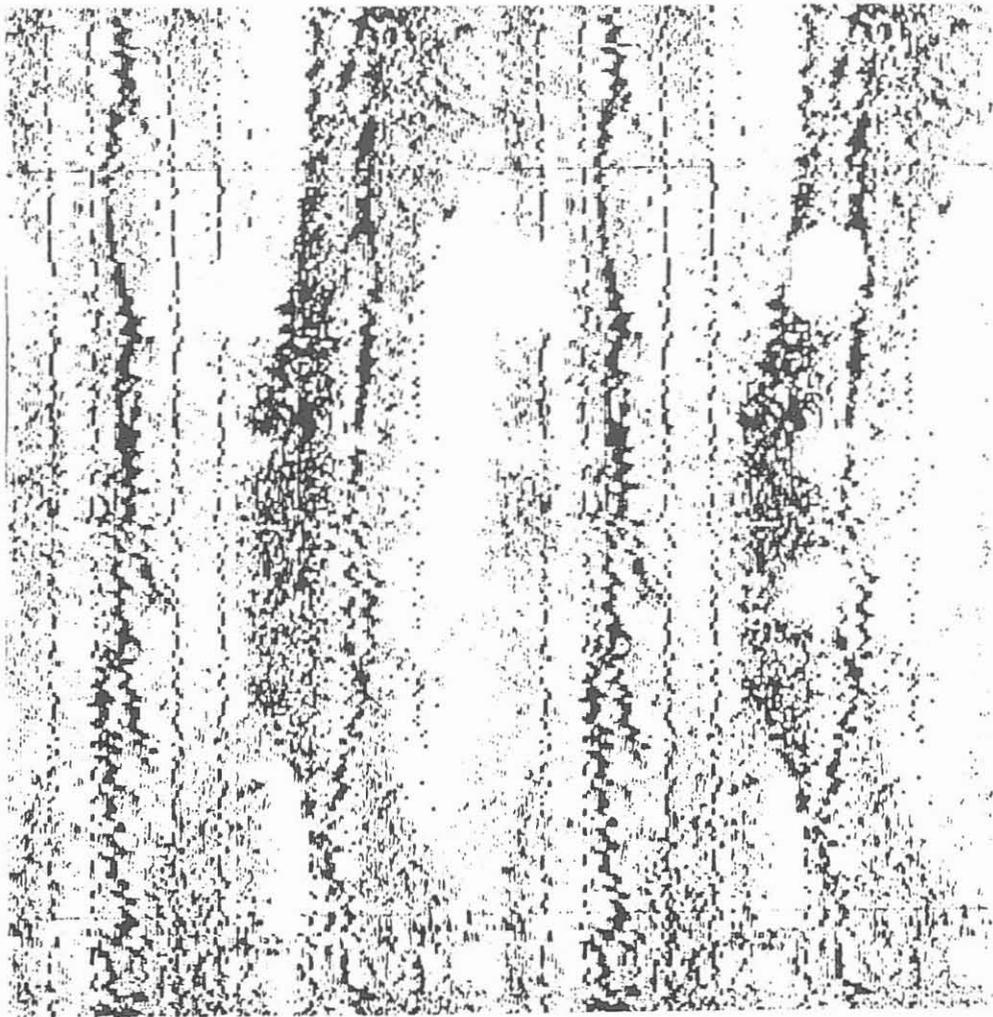


Abb. 12: Feldbeispiel (unbearbeitet) einer Televierermessung in einer Bohrung mit nicht kreisförmigem Querschnitt.

1798

1799



Abb. 13: Der gleiche Bohrlochabschnitt wie in der Abbildung 12 nach einer statistischen Bildbearbeitung.

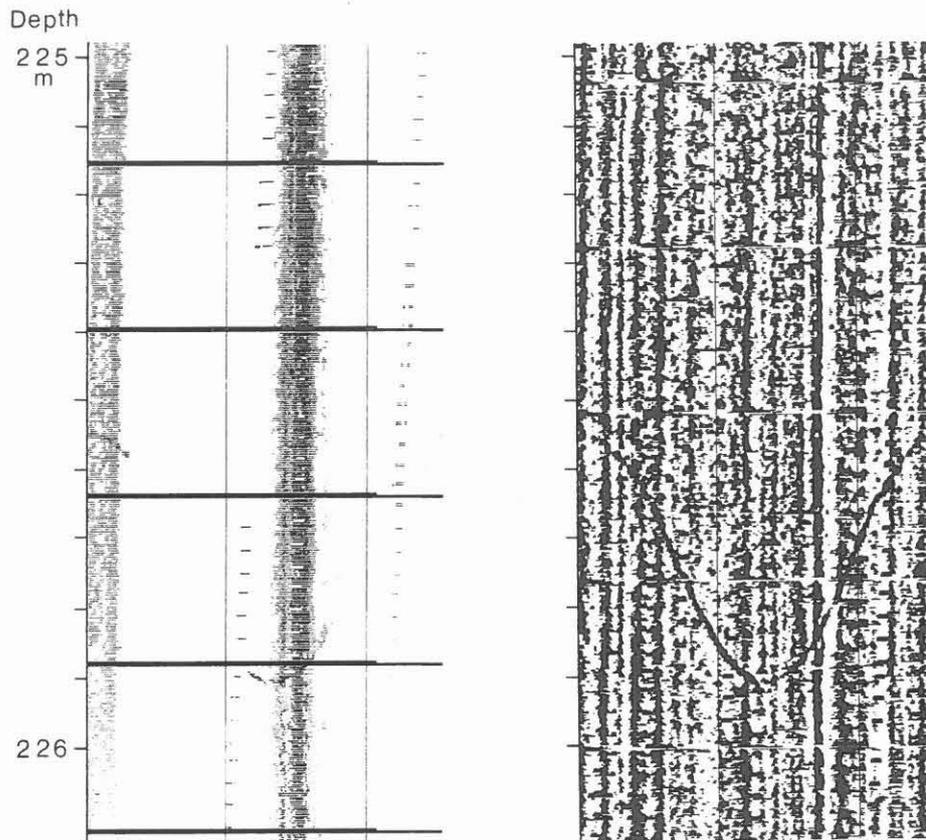


Abb. 14: Felddaten (links) und bearbeitete Daten (rechts).

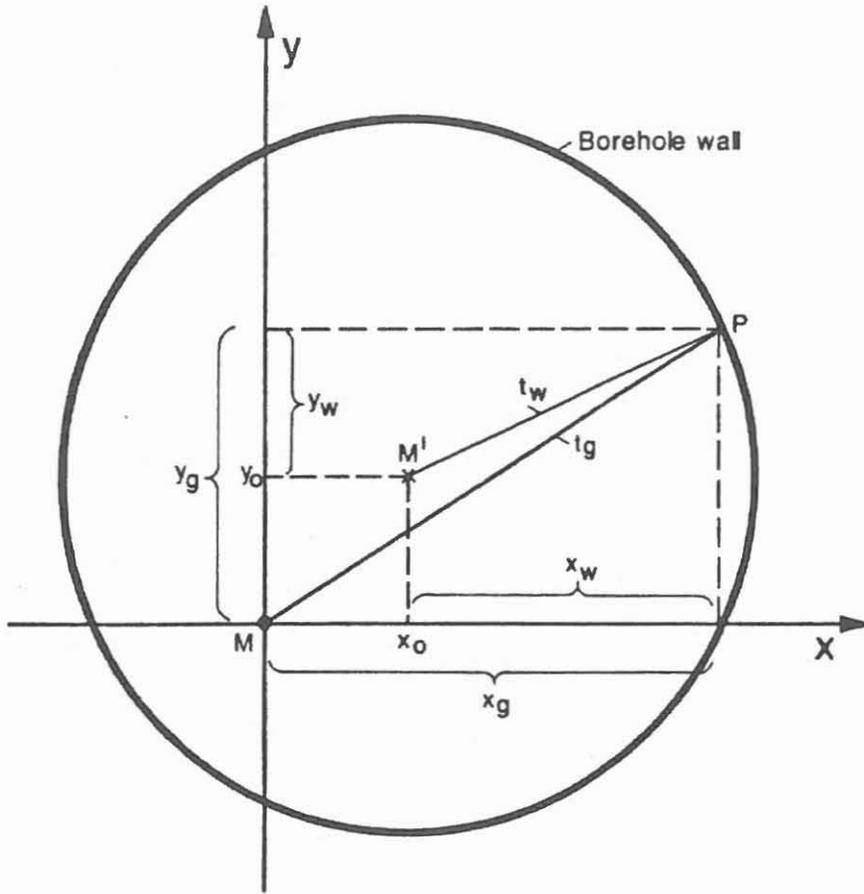


Abb. 15: Bezeichnungen zur Ableitung der Korrektur der Laufzeitwerte.

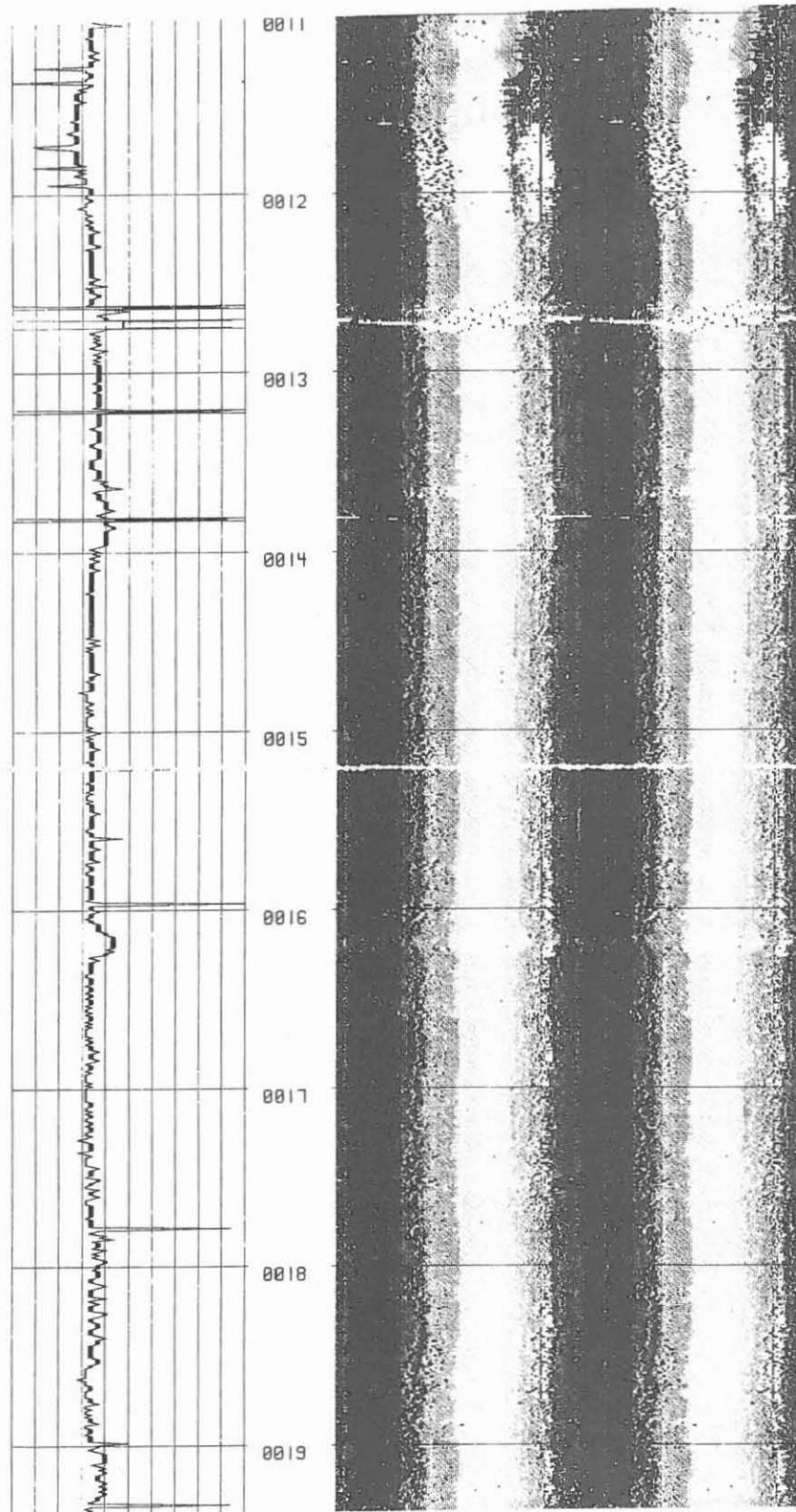


Abb. 16: Unkorrigiertes Laufzeitbild (rechts, doppelt abgerollt), und erste Spur des Laufzeitbildes (links).

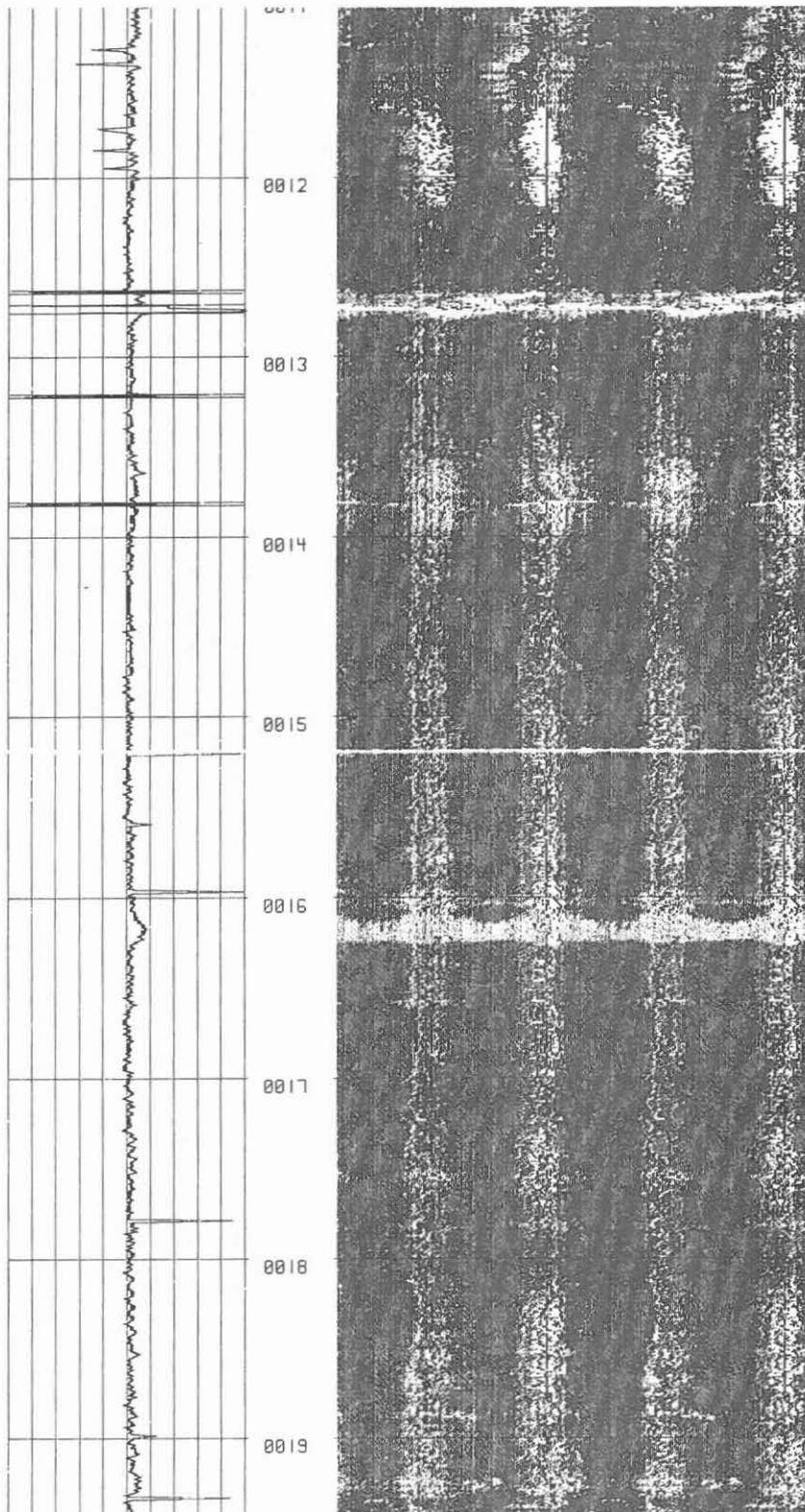


Abb. 17: Korrigiertes Laufzeitbild (rechts, doppelt abgerollt), und erste Spur des Laufzeitbildes (links).

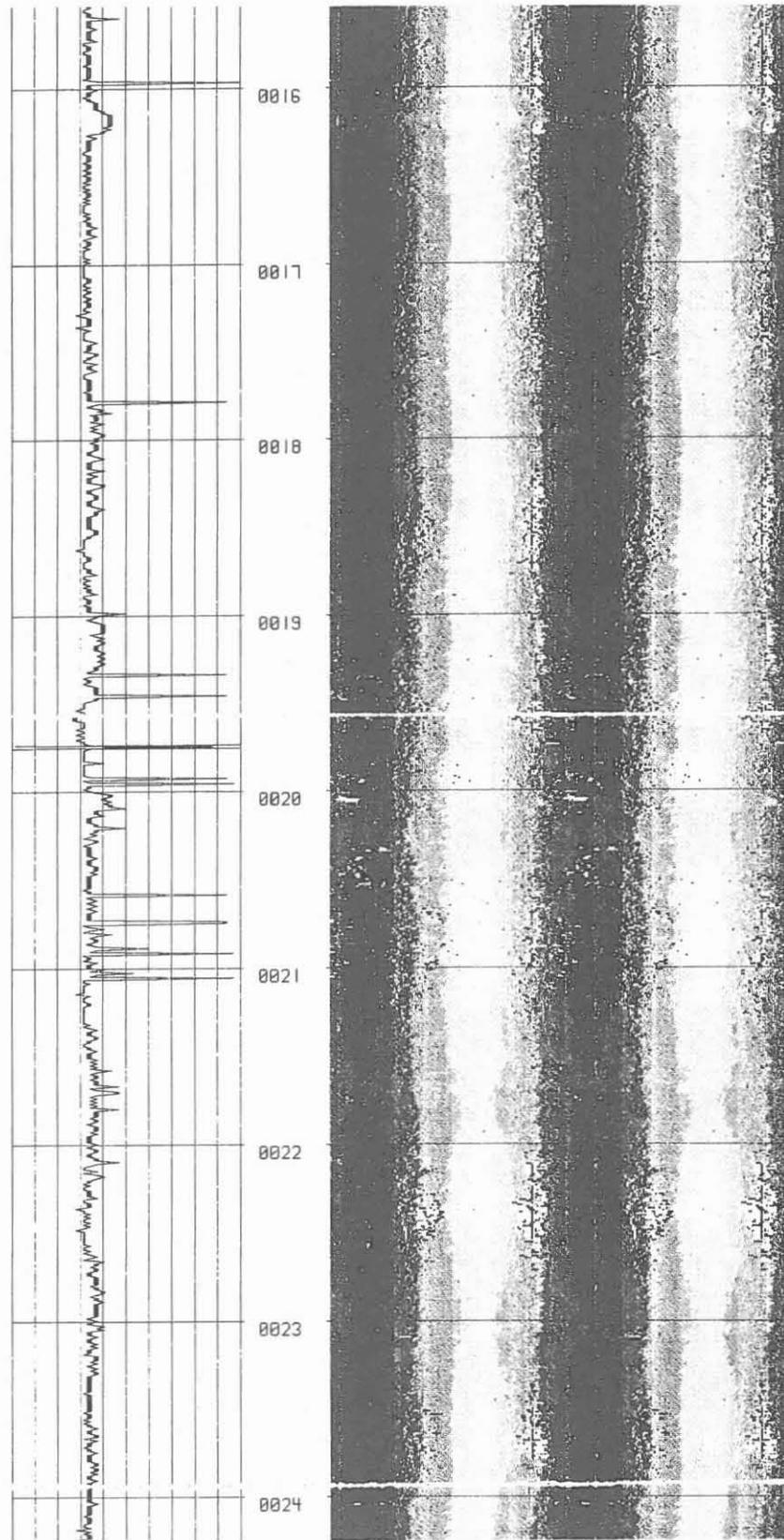


Abb. 18: Unkorrigiertes Laufzeitbild (rechts, doppelt abgerollt), und erste Spur des Laufzeitbildes (links).

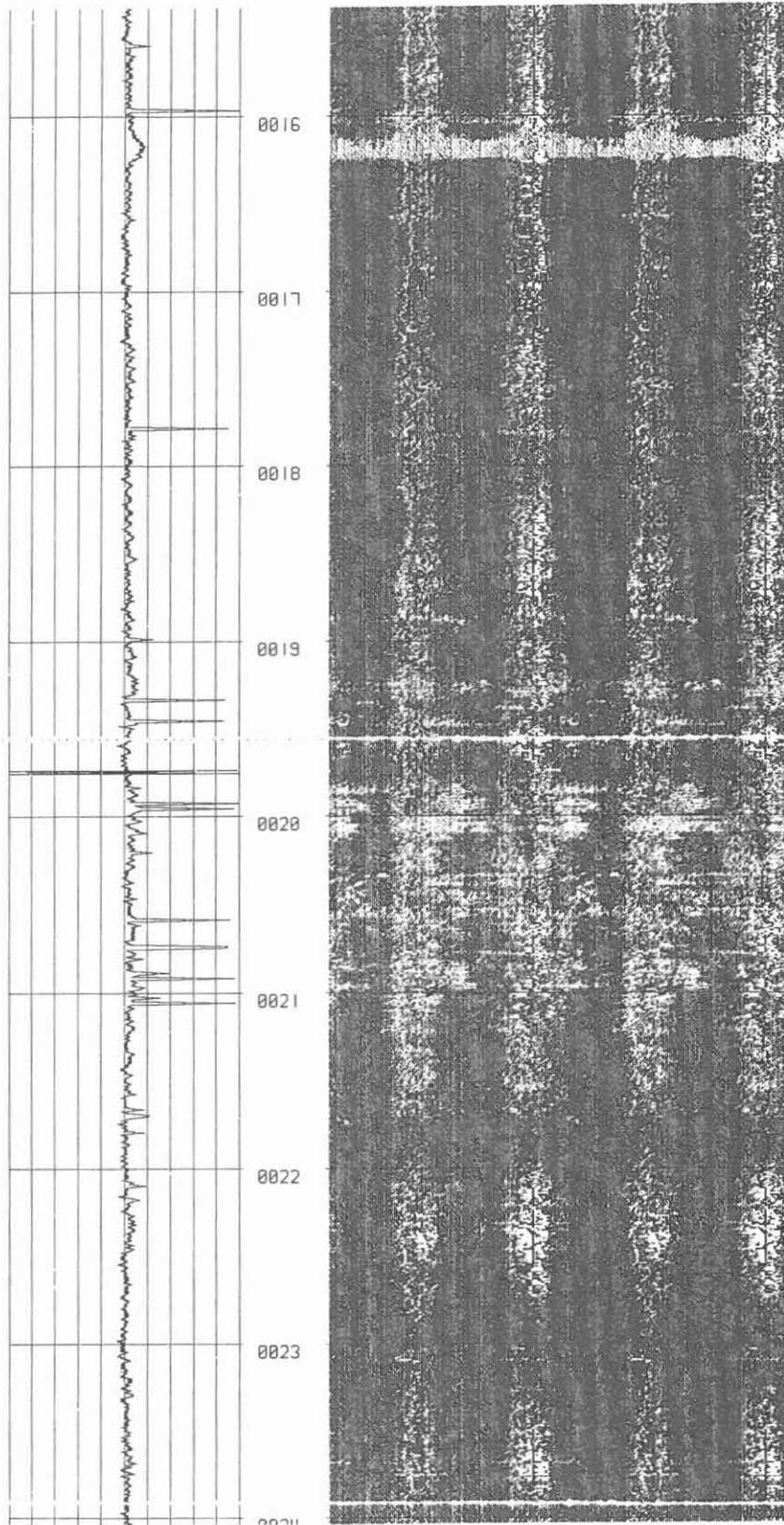


Abb. 19: Korrigiertes Laufzeitbild (rechts, doppelt abgerollt), und erste Spur des Laufzeitbildes (links).

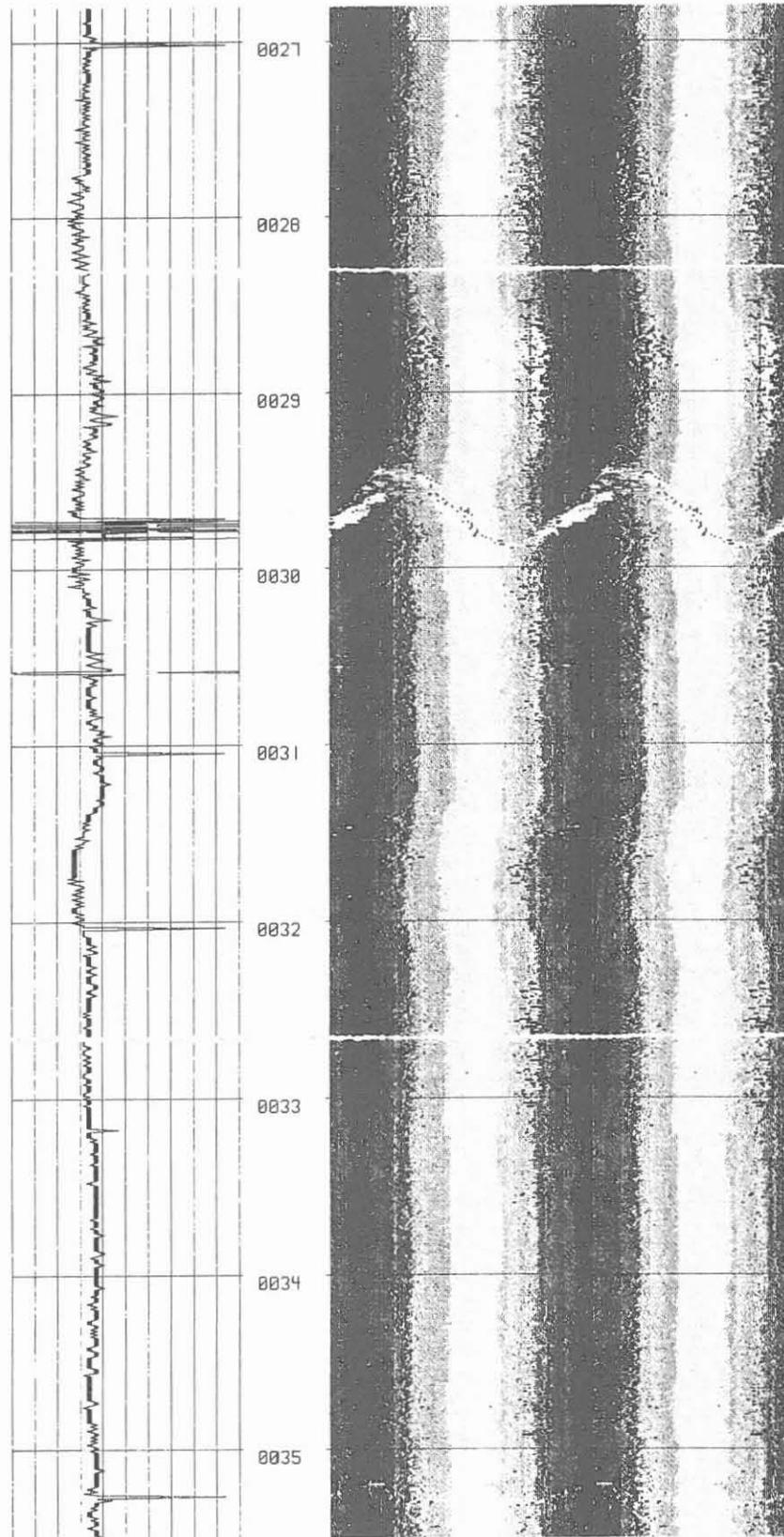


Abb. 20: Unkorrigiertes Laufzeitbild (rechts, doppelt abgerollt), und erste Spur des Laufzeitbildes (links).

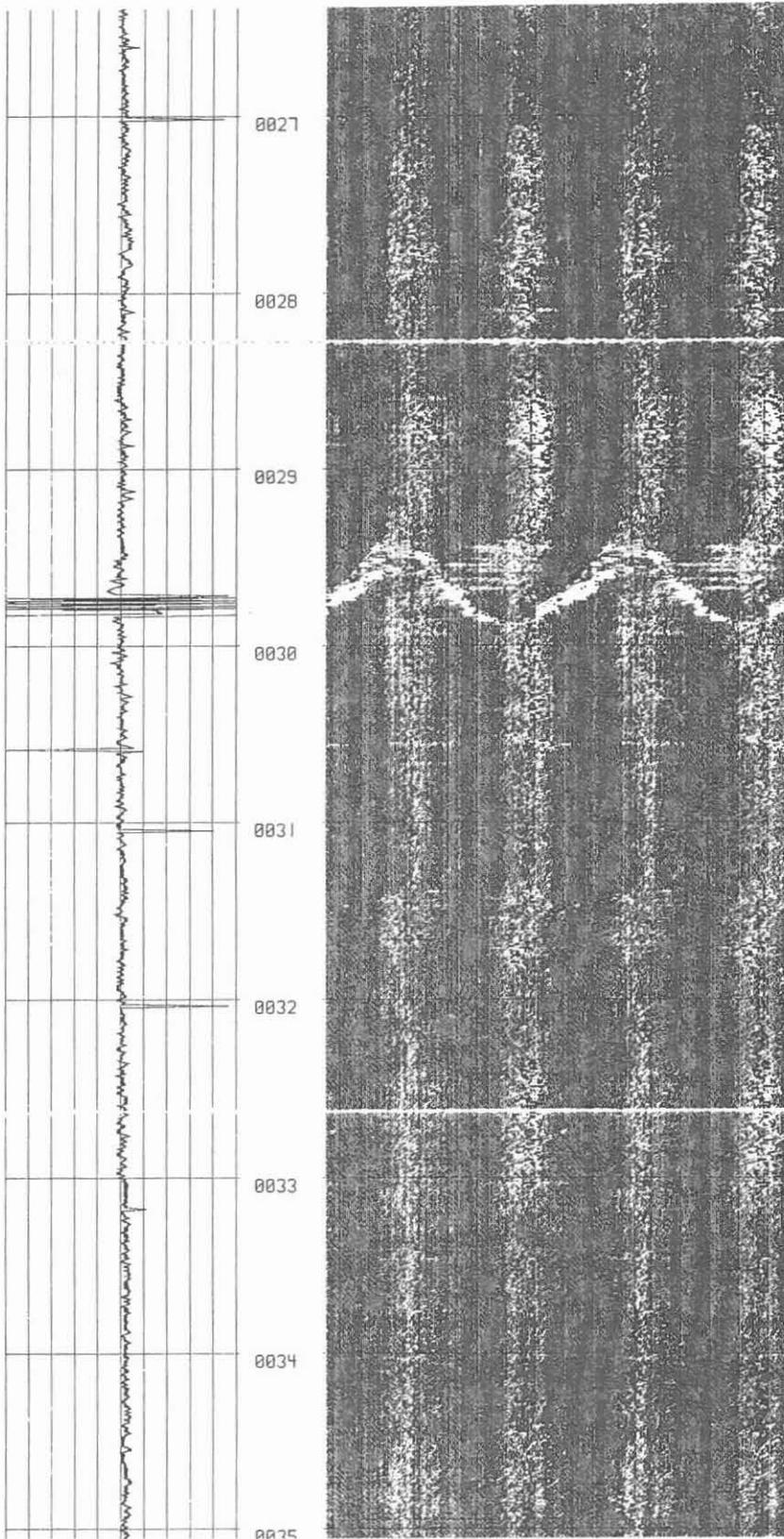


Abb. 21: Korrigiertes Laufzeitbild (rechts, doppelt abgerollt), und erste Spur des Laufzeitbildes (links).

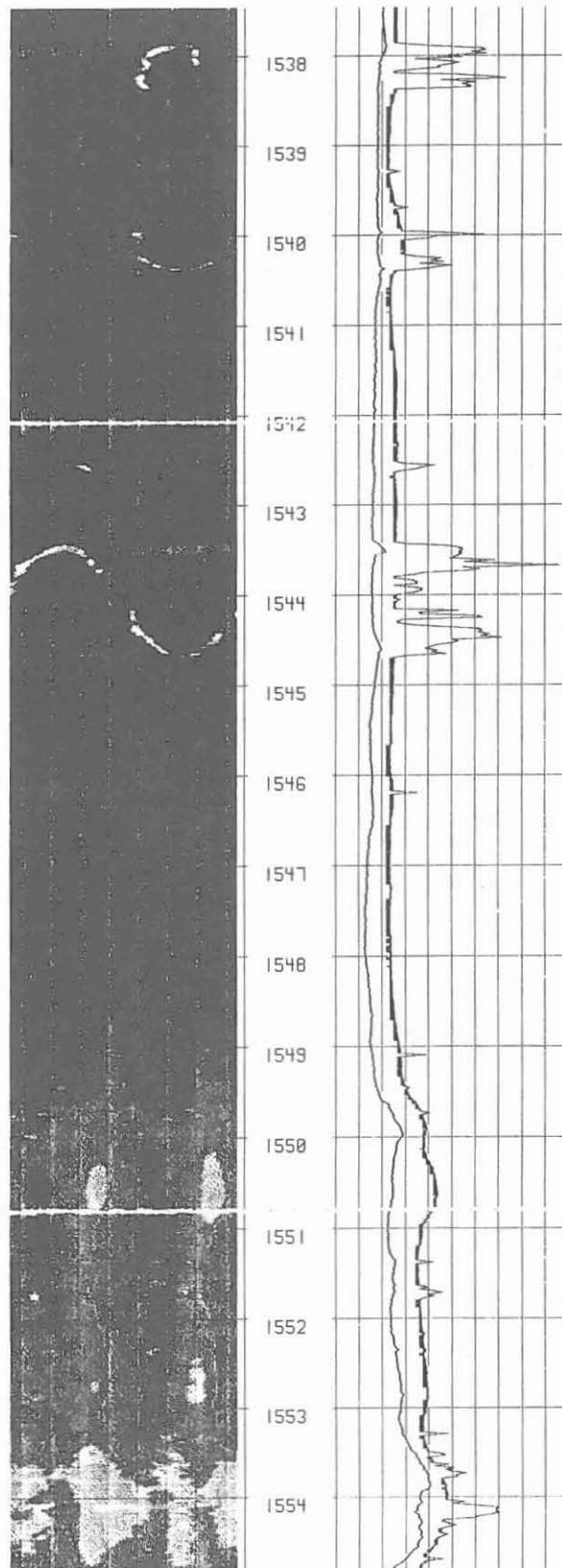


Abb. 22: Korrigiertes Laufzeitbild (links), minimaler und maximaler Radius (rechts).

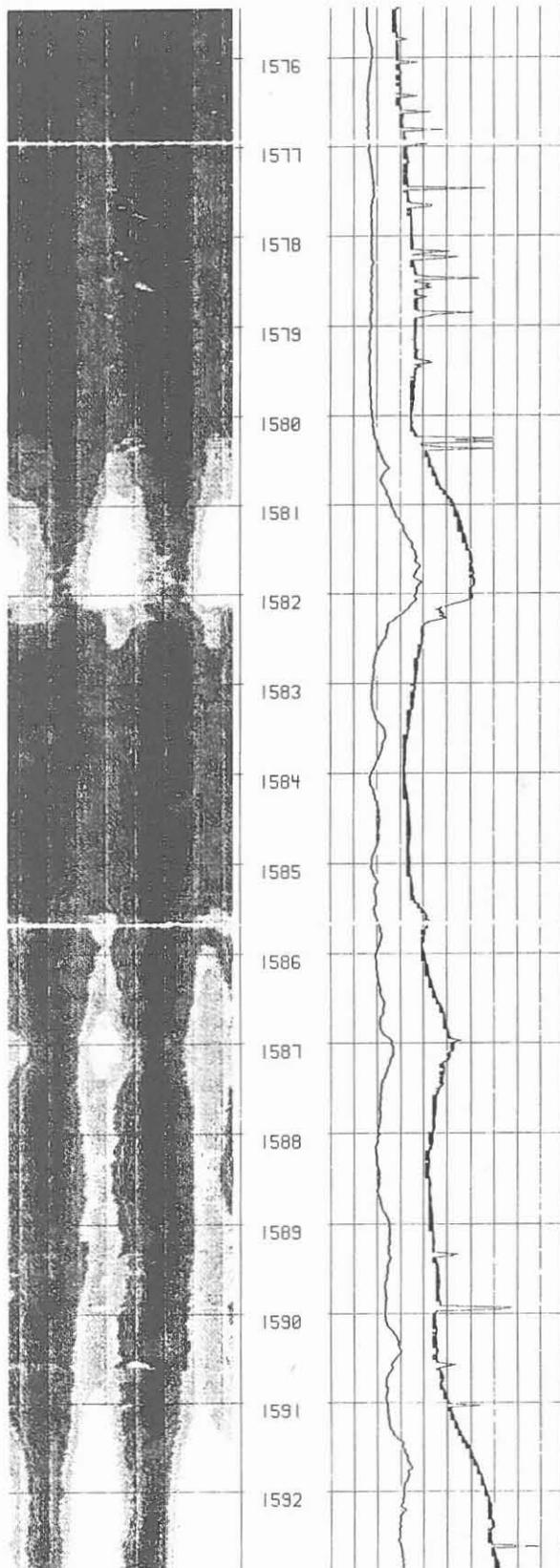


Abb. 23: Korrigiertes Laufzeitbild (links), minimaler und maximaler Radius (rechts).

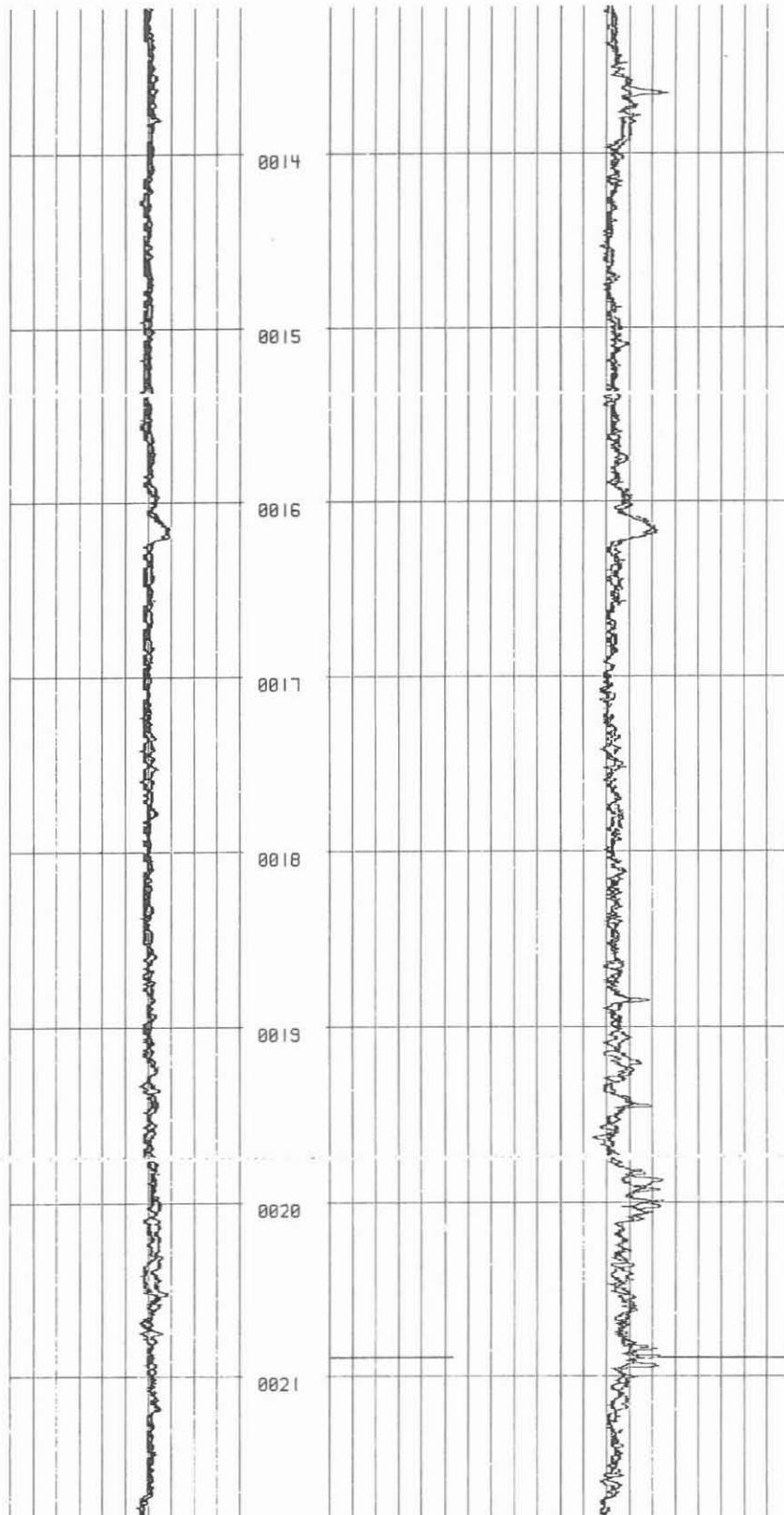


Abb. 24: Laufzeitdaten als Caliper Log in Nord-Süd und Ost-West-Richtung.

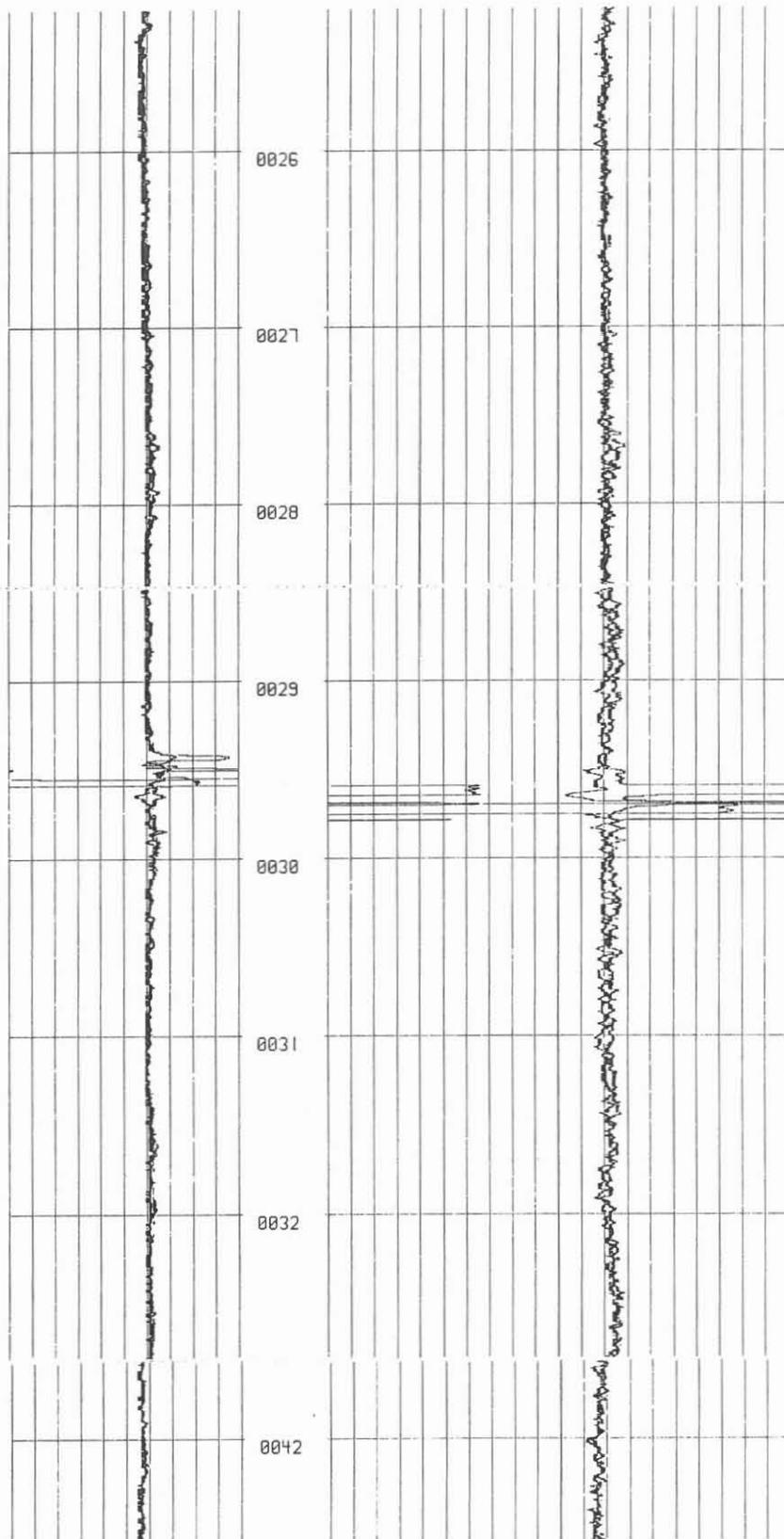


Abb. 25: Laufzeitdaten als Caliper Log in Nord-Süd und Ost-West-Richtung.

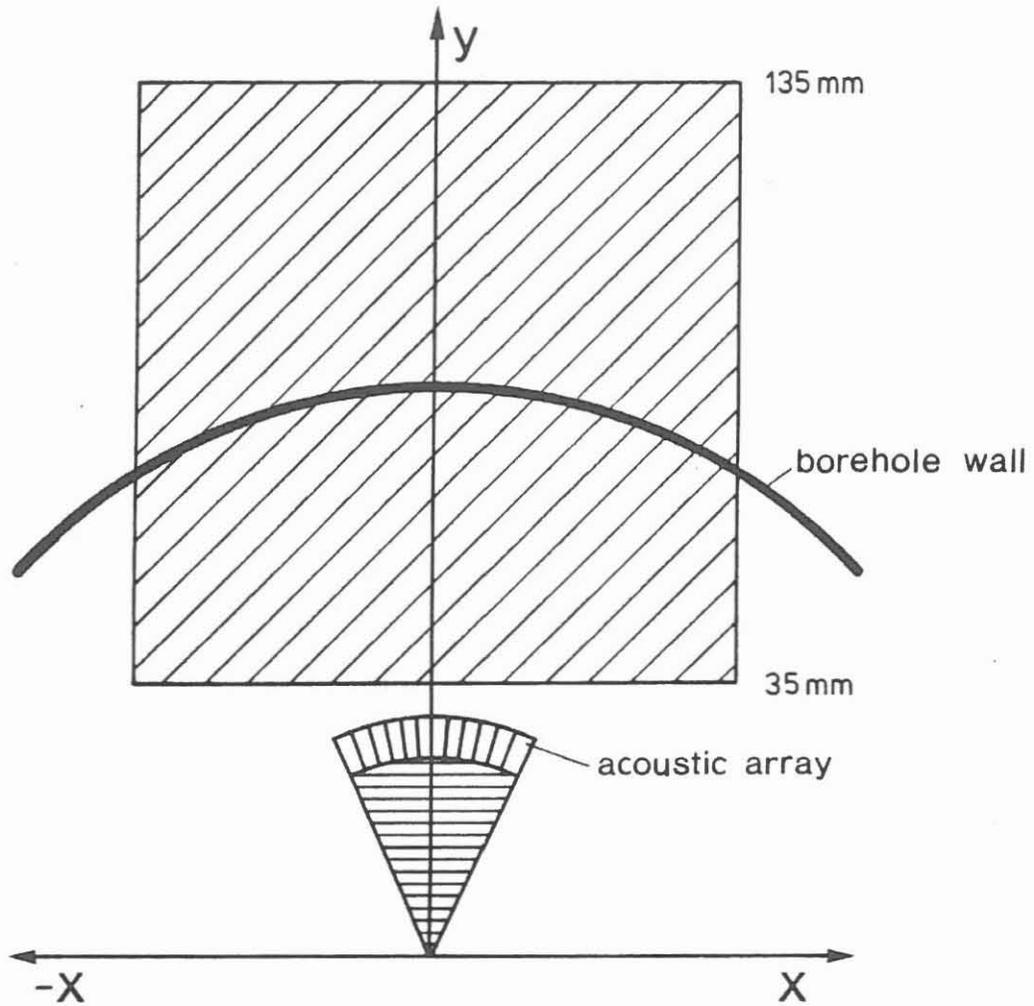


Abb. 26: Koordinatensystem für die Berechnung theoretischer Amplitudenverteilungen. Die schraffierte Fläche entspricht dem in Abbildung 9 dargestellten Bereich.

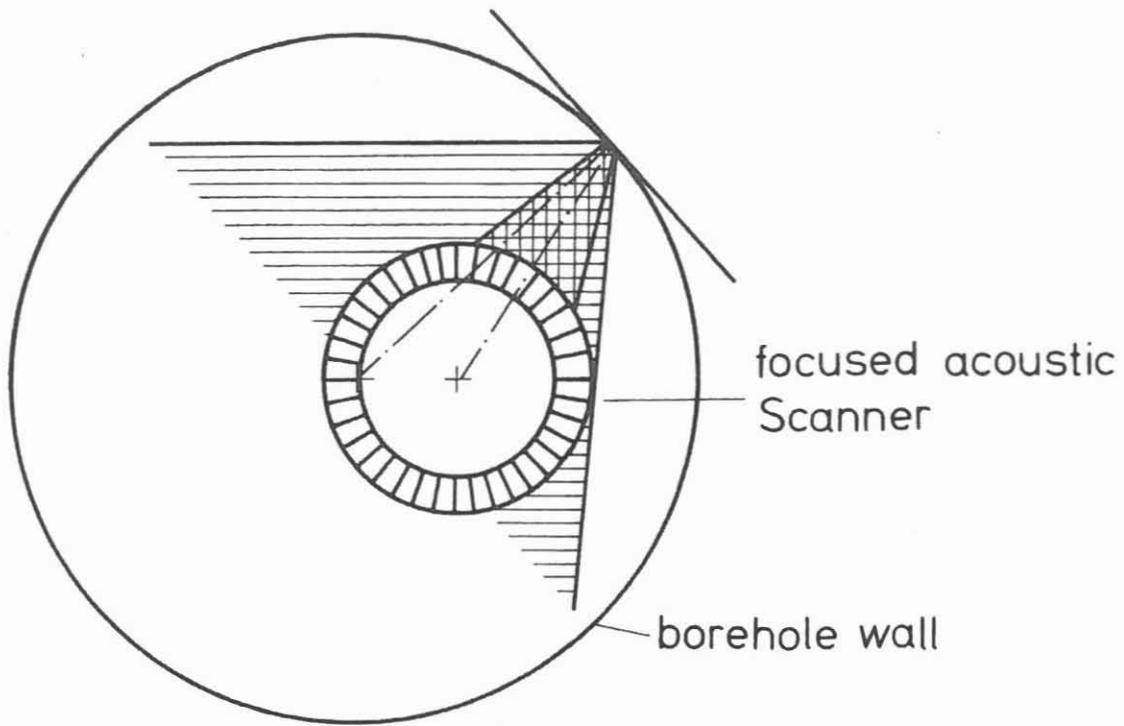


Abb. 27: Reflexion akustischer Energie an der Bohrlochwand bei einem fokussierenden System.

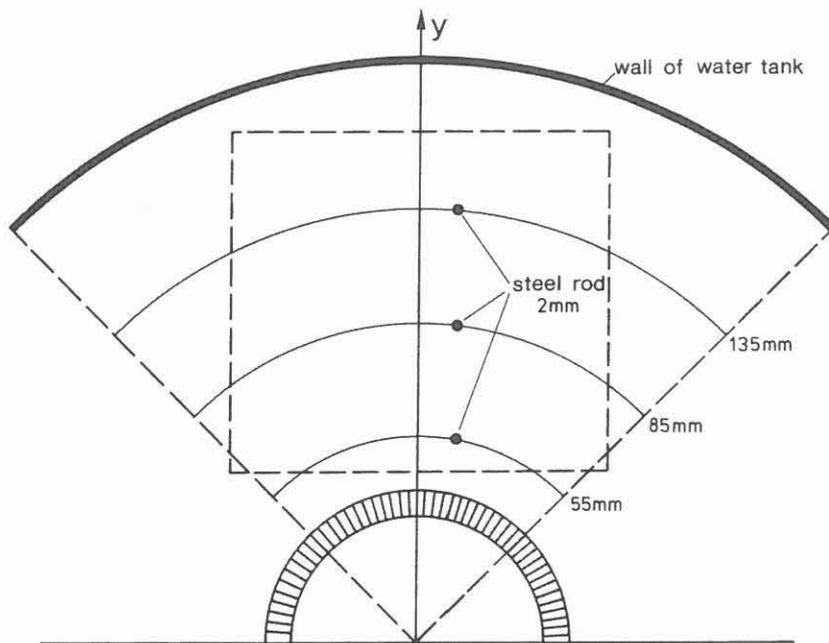


Abb. 28: Modellexperiment zur Messung der Reflexionsantwortfunktion akustischer Systeme.

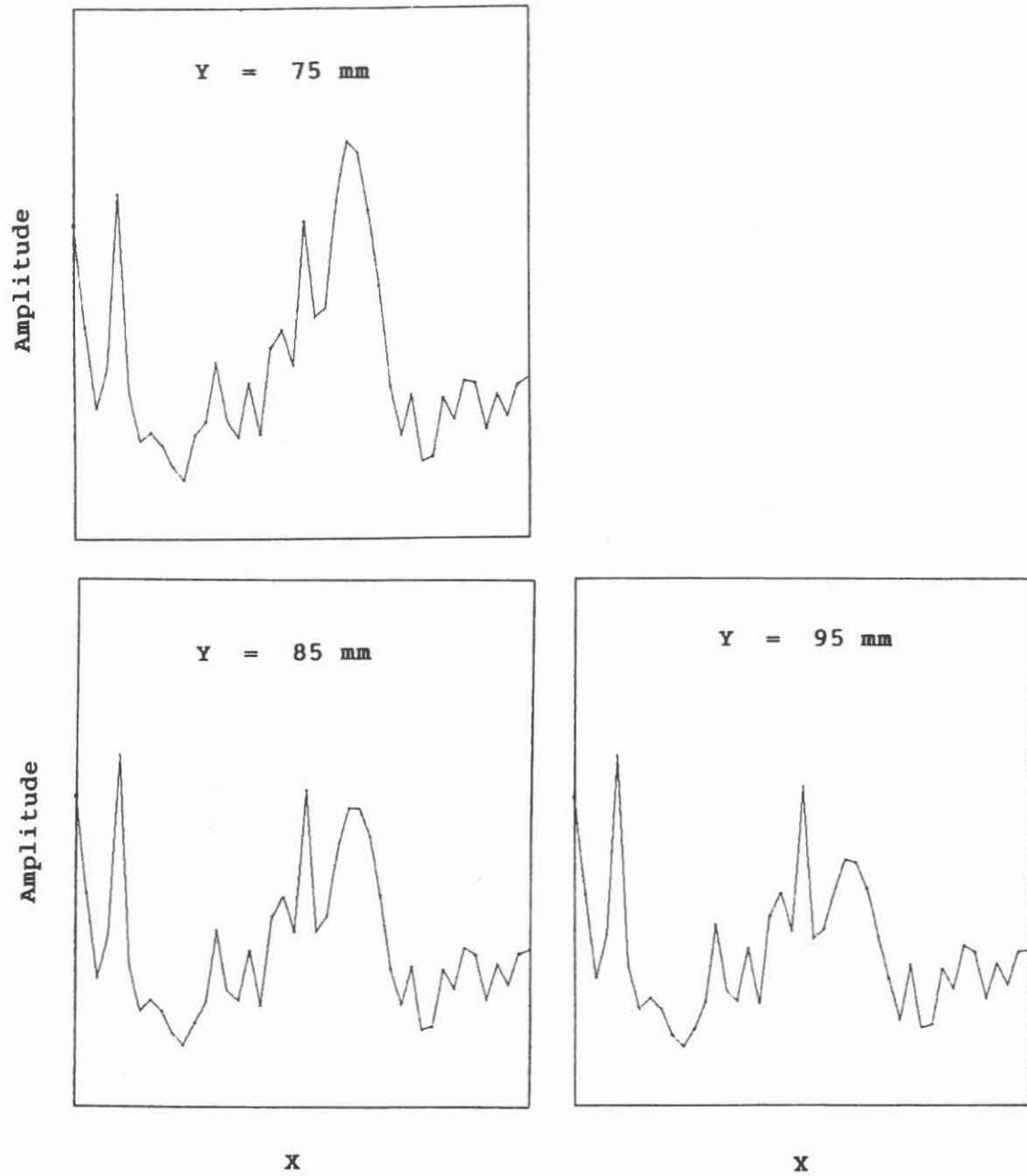


Abb. 29: Linienplots der Antwortfunktion eines 2 mm Drahtes in unterschiedlichen Entfernungen von einem Einzelschwinger mit einem Durchmesser von zwei Wellenlängen der Hauptfrequenz des abgestrahlten Signals.

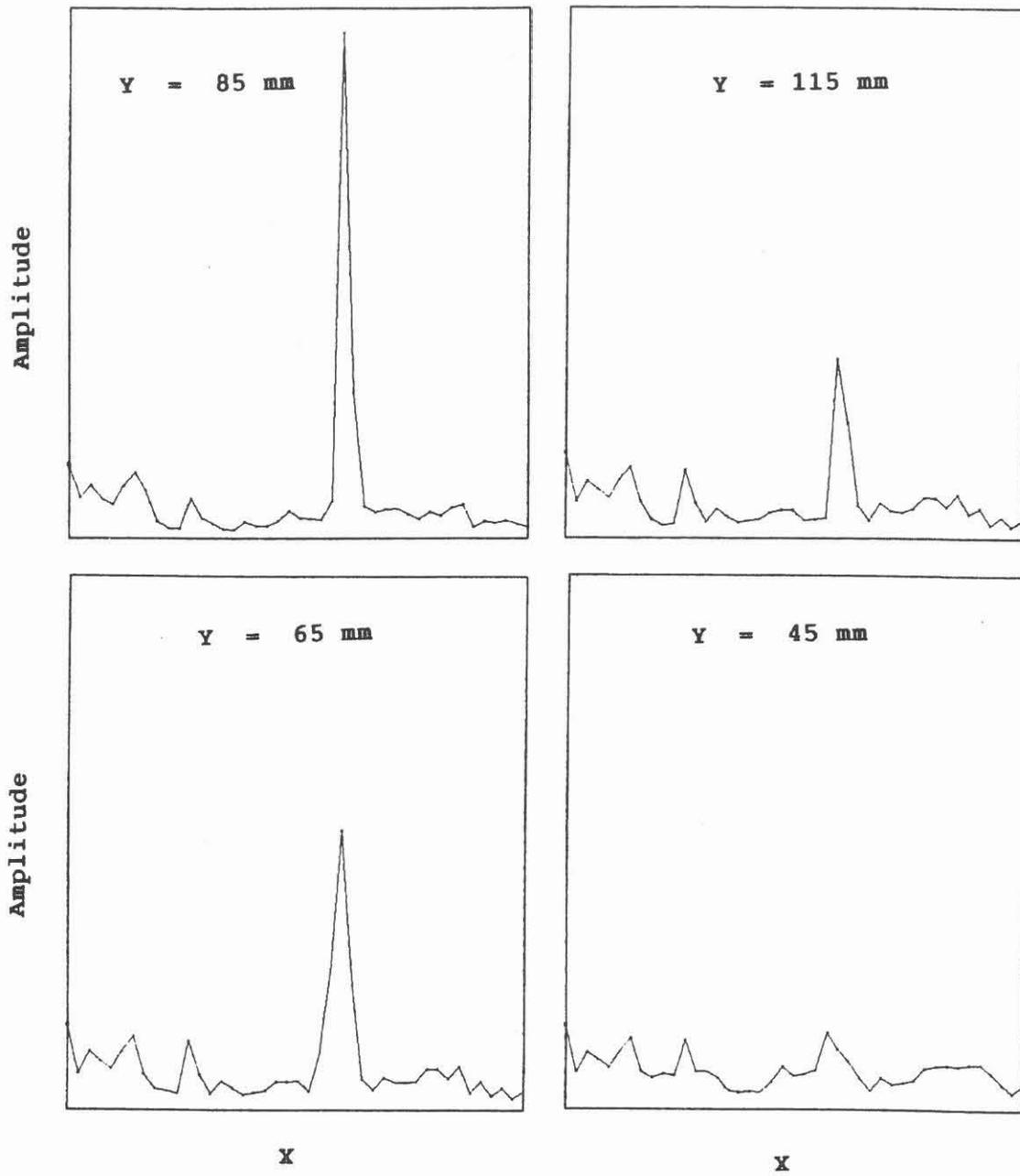


Abb. 30: Liniensplots der Antwortfunktionen eines 2mm Drahtes in unterschiedlichen Entfernungen von einem akustischen Array aus 16 Einzelschwingern.