

BOHRLOCH-REFLEXIONS RADAR MIT AZIMUTALER RICHTUNGSBESTIMMUNG

F. Sender, R. Thierbach

Zusammenfassung

Hochfrequente elektromagnetische Reflexionsverfahren nach dem Radar Prinzip haben sich zur geophysikalischen Exploration in geologischen Formationen mit geringer elektrischer Leitfähigkeit bewährt. Dies betrifft vorzugsweise Steinsalz- und Kalilagerstätten, aber auch Granite, Steinkohlenflöze und Permafrostgebiete.

Während Standard-Bohrlochlogs nur Informationen hinsichtlich der unmittelbaren Umgebung der Bohrung liefern, kann eine Radarsonde beispielsweise im Salz Eindringtiefen von mehreren hundert Metern erzielen. Bis zu diesen Entfernungen konnten z. B. Salzstöcke auf die Einlagerung von Tongestein, Anhydrit und Laugeneinschlüssen untersucht werden.

Mit der Entwicklung eines neuartigen Richtantennensystems ist es nunmehr möglich, einen wesentlichen Nachteil der herkömmlichen Bohrlochradartechnik zu überwinden, indem auch die azimutale Lage der Reflexionshorizonte bestimmt werden kann.

Für Tiefbohrlochmessungen bis zu ca. 3000 m wurde eine Sonde mit azimutaler Richtungsauflösung entwickelt und erprobt. Die Sonde hat einen Durchmesser von 88 mm und kann mit üblichen 7-adrigen Bohrlochkabeln gefahren werden.

Dieser Bericht beschreibt das Verfahren und die Ausrüstung. Es werden praktische Beispiele von Messungen in Tiefbohrungen präsentiert. Ebenfalls wird eine Übersicht hinsichtlich der Auswerteverfahren und weiterer Entwicklungstendenzen gegeben.

Hochfrequente elektromagnetische Reflexionsmessungen sind ein nützliches Hilfsmittel für die geophysikalische Exploration von Formationen mit geringer elektrischer Leitfähigkeit. Dies betrifft vorzugsweise Steinsalz- und Kali-, aber auch kristallines Gestein und Kohlelagerstätten. Hier können Unstetigkeitszonen für die Wellenausbreitung oft bestimmten petrographischen Eigenschaften zugeordnet werden, sodaß bestimmte Schichtgrenzen durch Auswertung der Laufzeiten von reflektierter elektromagnetischer Energie verfolgt werden können.

Betrachtet man dieses Verfahren mit den Augen eines Seismikers, so ist die Tatsache interessant, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen in festen Medien bei weitem nicht so grossen Schwankungen ausgesetzt ist, wie in der Seismik. Beispielsweise beträgt diese im Salz um 125 m/uSek. Unstetigkeiten, die zu nachweisbaren Reflexionen führen, werden vorwiegend durch Leitfähigkeits-, im Gegensatz zum Geschwindigkeitskontrast, verursacht. Hochfrequenzsysteme, welche im Frequenzbereich von 20 - 80 MHz arbeiten, erzeugen Wellenlängen um 6 m - 1,5 m, und bieten damit eine gute Voraussetzung zur Erkennung sehr dünner Schichten. Allerdings ist die maximale Reichweite auf ca. 1000 Meter begrenzt.

Die EMR-Technik hat vor allem im Kali- und Steinsalzbergbau ein weites Einsatzgebiet gefunden. Ein Großteil der petrographischen Strukturen kann nicht durch geophysikalische Oberflächenmessungen erfasst werden. Daher mußten EMR- Bohrlochmeßapparaturen entwickelt werden. Die Bilder 1 und 2 zeigen eine Tiefbohrlochsonde, wie sie von Prakla- Seismos in enger Zusammenarbeit mit der BGR für Messungen in Öl- gefüllten Bohrungen bis ca. 3000 m Tiefe entwickelt wurde. Um die Sonde in Verbindung mit Standard-Bohrlochkabeln einsetzen zu können, mußte ein spezielles Datenübertragungssystem entwickelt werden.

Für Messungen in bergwerksüblichen horizontalen Bohrlöchern wurde eine ähnliche Sonde entwickelt. (Bild 3 + 4) Im wesentlichen unterscheidet diese sich durch die Art des Verfahrens im Bohrloch. Diese Bilder zeigen die hydraulische Vorschubeinrichtung und die Kabel- Speicherwinde.

Sobald sich die gesamte Sonde im Salz - oder sonstigem Medium geringer elektrischer Leitfähigkeit - befindet können sich die Hochfrequenzsignale ausbreiten und werden von Schichtgrenzen reflektiert, wie in Bild (5) schematisch dargestellt.

Das empfangene Signal wird in 2 Nanosek. Intervallen abgetastet. Dabei wird von jedem Sendeimpuls nur ein Abtastwert gewonnen und in digitaler Form über das Kabel an die Aufnahmeapparatur

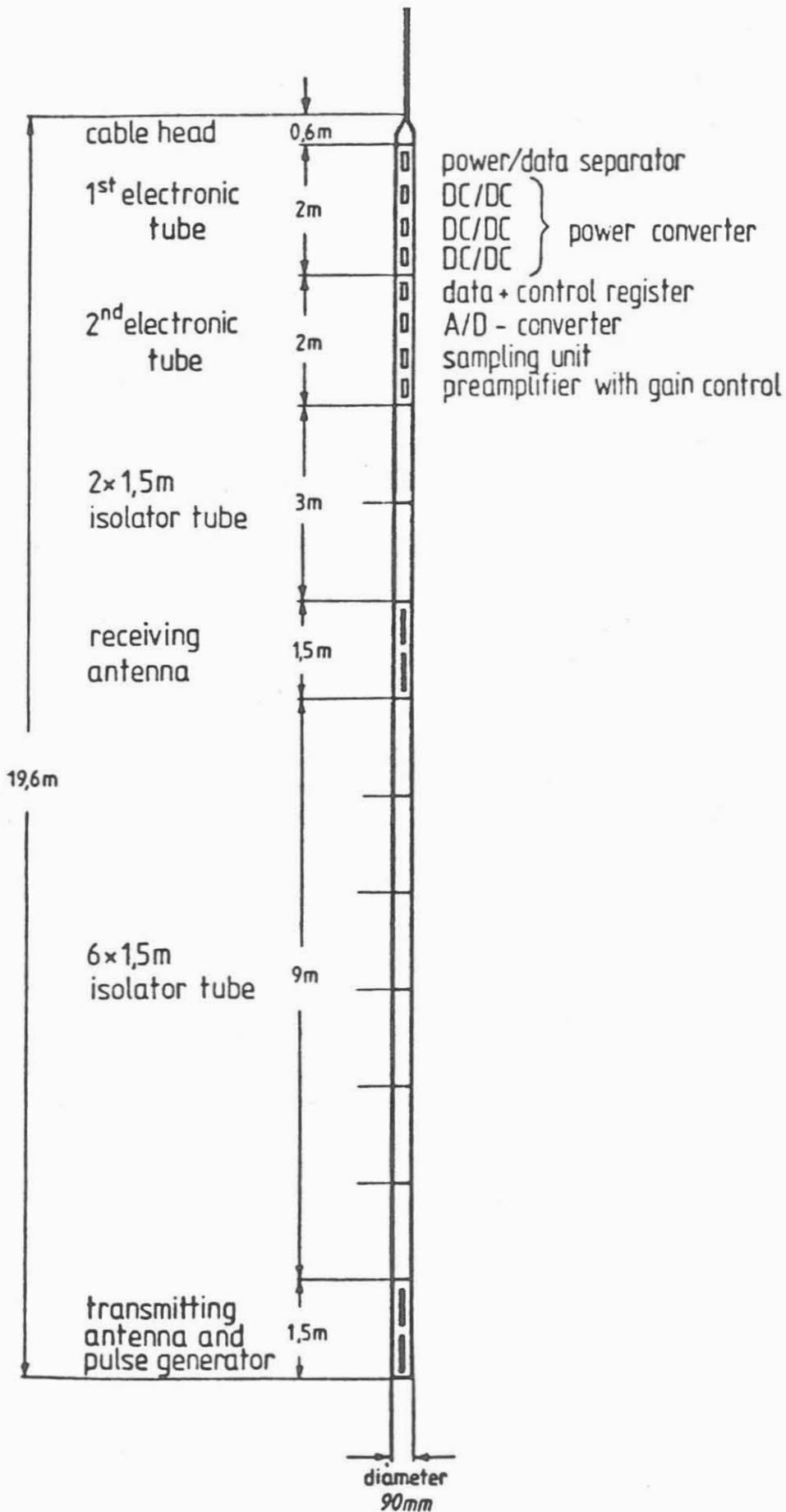


Bild 1 Tiefbohrlochsonde schematisch

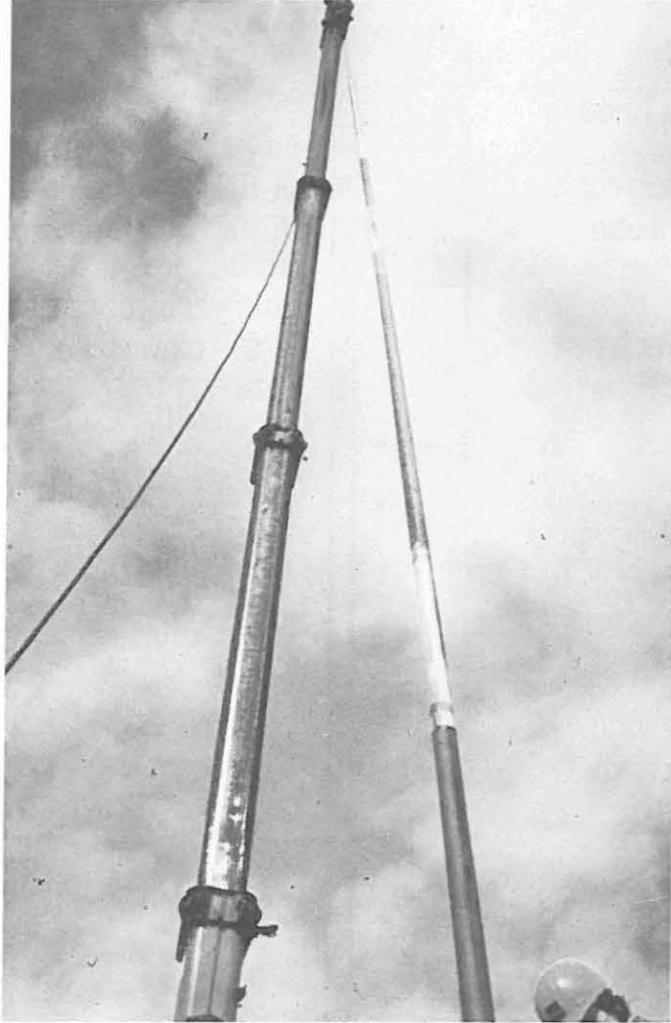


Bild 2: Tiefbohrlochsonde im Einsatz

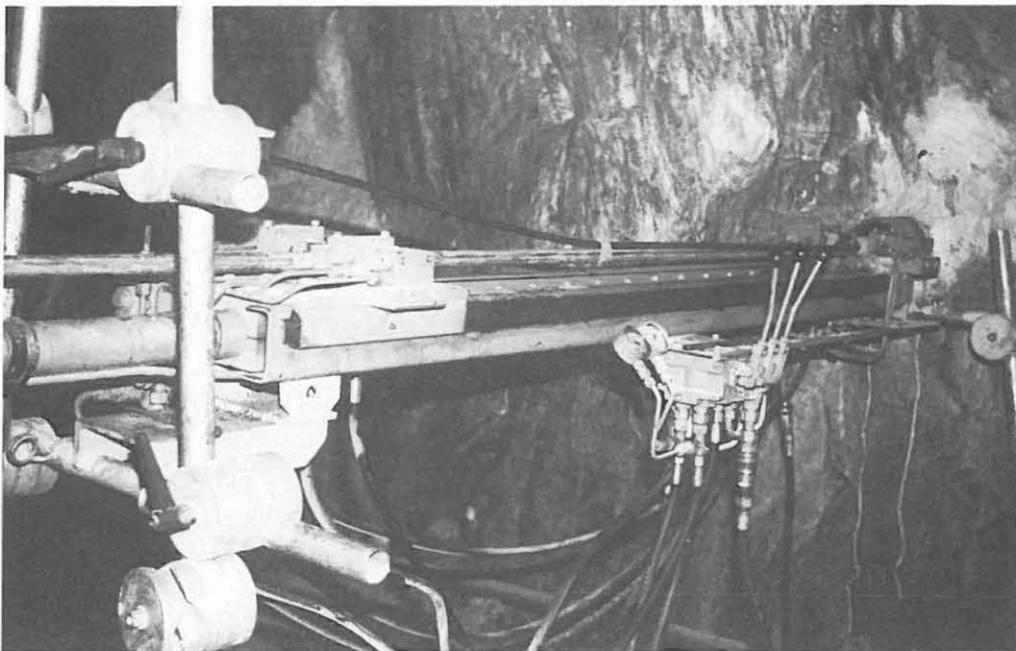


Bild 3: Vorschubeinrichtung für Horizontalsonde

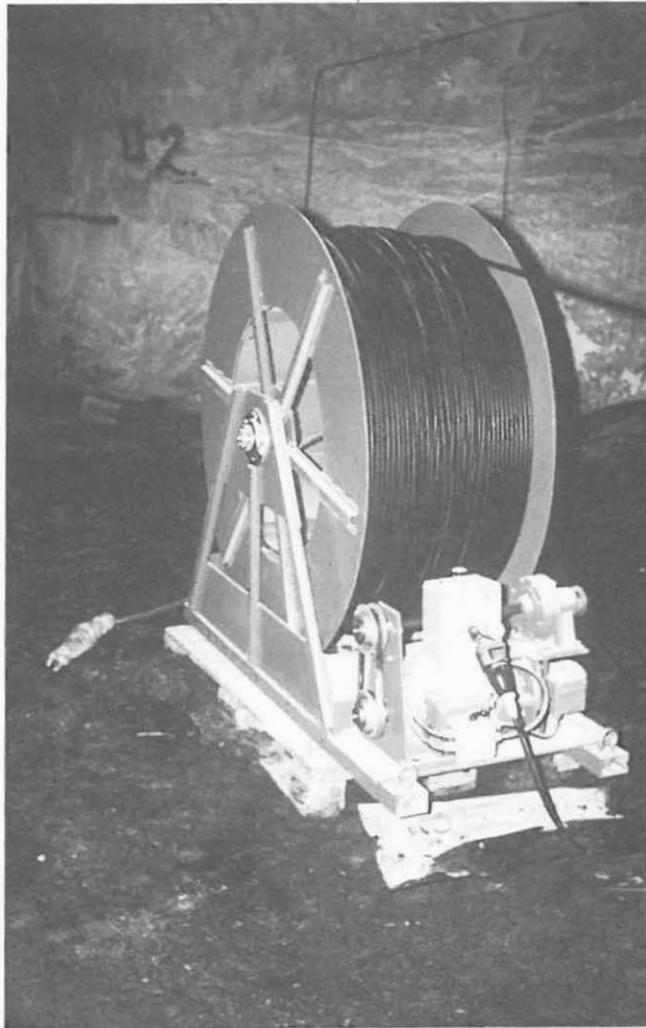


Bild 4: Kabelwinde für Horizontalsonde

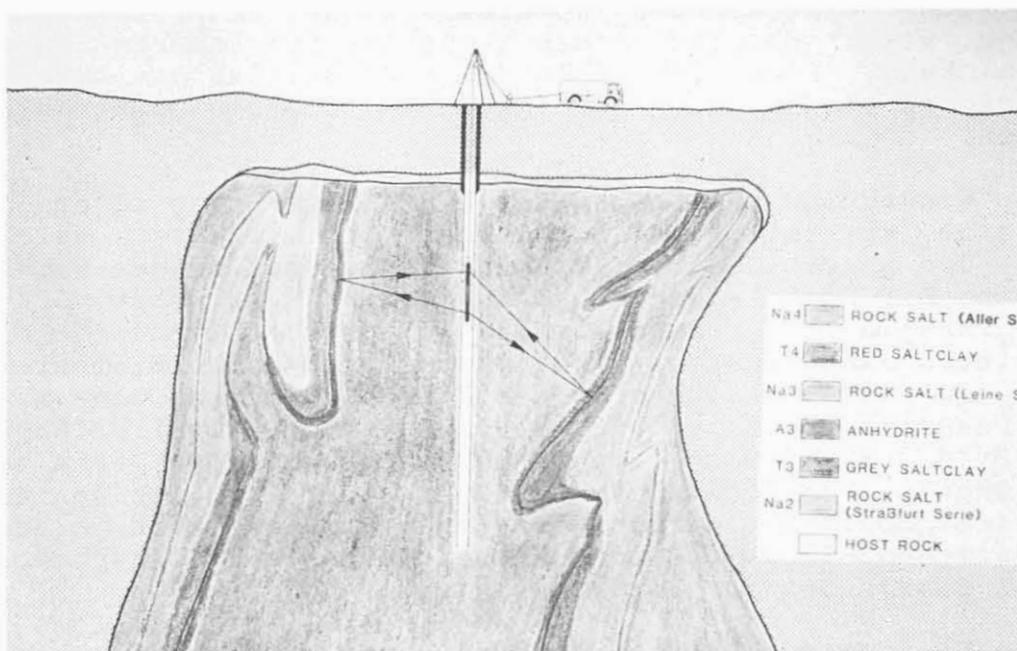


Bild 5: HF-Ausbreitung im Salz

übertragen. Für eine Registrierzeit der Radarsignale von 2 uSek. sind 1000 Abtastwerte zu übertragen. Dies entspricht bei einer typischen senderseitigen Pulsrate von 1000 Hz einer Aufnahmedauer von 1 Sek. Für die übliche Registrierzeit von 10 uS - entsprechend einer Reichweite von ca. 650 m - wird eine Aufnahmeauer von 5 Sek. benötigt.

Bild 6 zeigt eine typische Aufnahme. Diese setzt sich aus 5 Intervallen von je 2 uSek. zusammen, wobei der Verstärkungsgrad von Intervall zu Intervall steigend gewählt wurde. Es sind eine Reihe von Reflexionshorizonten bis in den 9 uS - Bereich, entsprechend ca. 600 m Entfernung zu erkennen. Im oberen Teil bis ca. 270 m Tiefe befand sich die Sonde noch im Anhydritbereich mit höherer Signaldämpfung.

Die Reflexionen können teilweise korreliert werden mit den von Bohrkernen gewonnenen petrographischen Schichtdaten, sofern diese von der Bohrung aufgeschlossen werden. Orientierte Bohrkern geben weiterhin Aufschluß hinsichtlich der azimuthalen Streichrichtung und dem Einfallen dieser Schichten im näheren Umgebungsbereich der Bohrung.

Im Bild 7 ist eine typische Darstellung durch Projektion der ausgewerteten Reflexionen in eine Ebene dargestellt. Bild 8 bietet eine aus der Sicht des Geologen weiterverarbeitete Darstellung. Es zeigt sich, daß ein Großteil der Reflexionen von Schichtfolgen stammen, welche nicht vom Bohrloch durchteuft wurden. Damit können zwar Aussagen über das Einfallen und die Art des Reflektors gemacht werden, nicht aber über das Azimut. Letzteres ist jedoch für das Erkennen der räumlichen Struktur wichtig.

Bild 9 zeigt einen typischen Fall, bei dem für zwei Reflektoren, welche nicht die Bohrung kreuzen, keinerlei richtungsmässige Zuordnung, weder absolut, noch relativ zu anderen Horizonten erfolgen kann. Dies ist dadurch bedingt, daß die Antennen der Bohrlochsonde rundum mit der gleichen Energie abstrahlen und empfangen.

Um eine eindeutige Bestimmung der Einfallsrichtung zu ermöglichen wurde eine spezielle Bohrlochantenne entwickelt, welche es erlaubt, den azimuthalen Einfallswinkel des empfangenen Signales zu bestimmen. Die normale Technik der Richtantennen setzt voraus, daß das Phasenfeld der einfallenden Welle über mehrere Elemente abgetastet und ausgewertet wird. Dazu müssen diese Elemente einen Abstand aufweisen, welcher in der Einfallsrichtung eine möglichst grosse Phasendifferenz erfaßt, z.B. eine Viertelwellenlänge oder mehr. Bild 10 zeigt etwa maßstabgerecht das Verhältnis von Wellenlänge zu Bohrlochdurchmesser bei einer Frequenz von 40 MHz. Es dürfte deutlich daraus hervorgehen, daß kein brauchbares Phasendifferenzsignal für eine Mehrelementantenne innerhalb eines normalen Bohrloches zur Verfügung steht.

Für die Belange der Bohrlochtechnik wurde eine spezielle schlanke

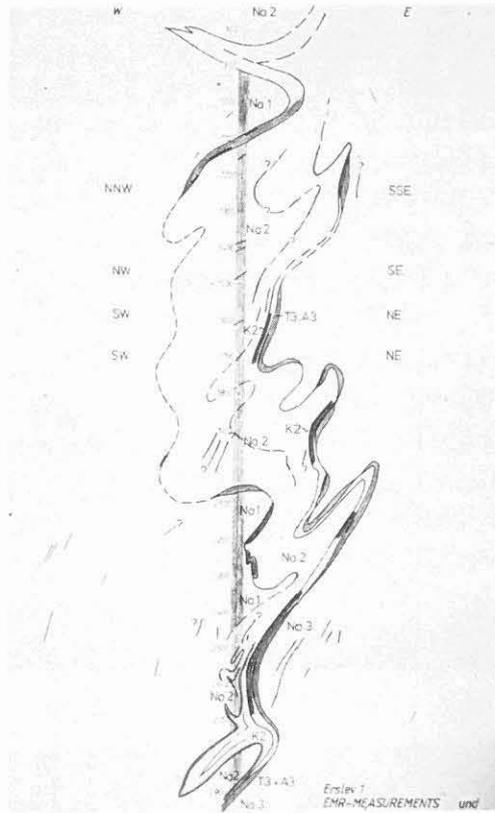


Bild 8: Auswertung einer Reflexionsdarstellung

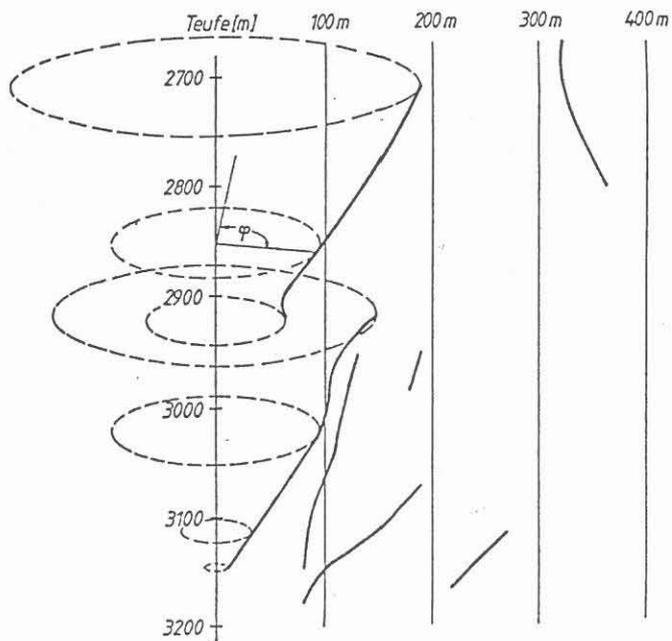


Bild 9: Rundumcharakteristik von zwei Reflexionen

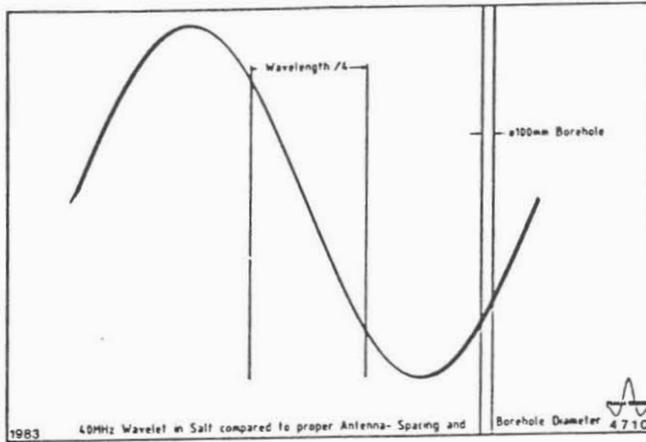


Bild 10: Verhältnis von HF-Wellenlänge zu Bohrlochdurchmesser

E - FIELD ANTENNA PATTERN ----
H - FIELD ANTENNA PATTERN - - - -
CARDIOID - SUM PATTERN ———

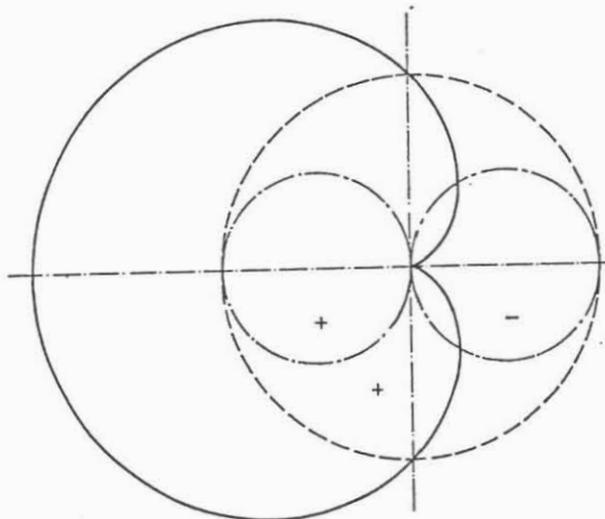


Bild 11: E-Feld-, H-Feld- und Kardiod-Charakteristik

Rahmenantenne entwickelt, welche auf den magnetischen Feldvektor anspricht. Die Rahmenantenne hat eine achtförmige Richtcharakteristik, deren Zweideutigkeit im Peilerggebnis durch die Kombination mit einer Dipolantenne beseitigt wird. Wie Bild 11 zeigt, ergibt die Kombination der Achter- mit der Rundumcharakteristik eine Kardioide mit einer eindeutigen Nullstelle.

Bild 12 zeigt schematisch die endgültige Ausführungsform dieser Antenne. Sie besteht aus zwei gestockten Kreuzrahmenantennen. Das mechanische Problem der Einpassung in den schlanken Sondenkörper konnte ebenso erfolgreich gelöst werden, wie das Problem der elektrischen Anpassung für Impulssignale. Eine spezielle elektrische Auskoppelschaltung erlaubt, die beiden Kreuzrahmenanordnungen gleichzeitig als Dipolantenne mit gemeinsamen Antennenmittelpunkt zu verwenden. Als Richtungsreferenz dient ein Bohrlochsonden-Magnetkompaß.

Wie Bild 13 zeigt, liefert die Antenne drei Ausgangssignale: Zwei azimutabhängige komplementäre Signale von den gekreuzten Rahmen, und ein winkelunabhängiges Rundumsignal vom Dipol. Diese Signale werden nacheinander mit drei Aufnahmen registriert.

Für die Richtungsbestimmung hat sich als zweckmässig erwiesen, nicht unmittelbar die Kardioide-Charakteristik aus Rahmen und Dipol anzuwenden. Vielmehr wurden rechnerisch die Kreuzrahmendaten kombiniert und so dargestellt, als ob ein Einzelrahmen in z.B. 15 Grad Schritten gedreht worden wäre. Bild 14 zeigt eine polare Darstellung der Signale. Die redundanten zwei Minima für die jeweiligen Reflexionen sind hier gut zu erkennen. Ein Vergleich der jeweiligen Maxima mit der Polarität des Dipolsignales erlaubt dann eine eindeutige Richtungszuweisung.

Während die Polardarstellung von Bild 14 besser den richtungsmässigen Zusammenhang veranschaulicht, erwiesen sich die Darstellungen in paralleler Zeilenstruktur des nächsten Bildes Nr.15 für die Auswertung als vorteilhafter.

Da die Empfangssignale in digitaler Form gewonnen werden, lag die Entwicklung eines rechnergestützten Auswerteverfahrens nahe, welches ohne Interpretation durch einen Auswerter direkt zu einer Richtungsangabe führt.

Die Amplituden der Rahmenspannungen sind infolge der orthogonalen Antennenanordnung jeweils proportional dem Sinus bzw. Kosinus des Einfallswinkels. Folglich könnte für den Fall, daß es sich um lineare Größen handelte, der Einfallswinkel direkt aus dem Arcustangens des Quotienten beider Spannungen errechnet werden. Im Falle von Wellenzügen, wie sie bei Reflexionen auftreten, ist ein grösserer Rechenaufwand nötig. Es müssen über ein Zeitsegment, welches etwa der Länge einer Reflexion entspricht, die Quadrat- und Produktsummen der einzelnen Signale gebildet, und verarbeitet werden. Eine detaillierte mathematische Darstellung würde den Rahmen dieses Vortrages sprengen.

Vielmehr sollen hier typische Ergebnisdarstellungen gezeigt werden. Bild 16 zeigt die Aufnahmesektion einer Durchstrah-

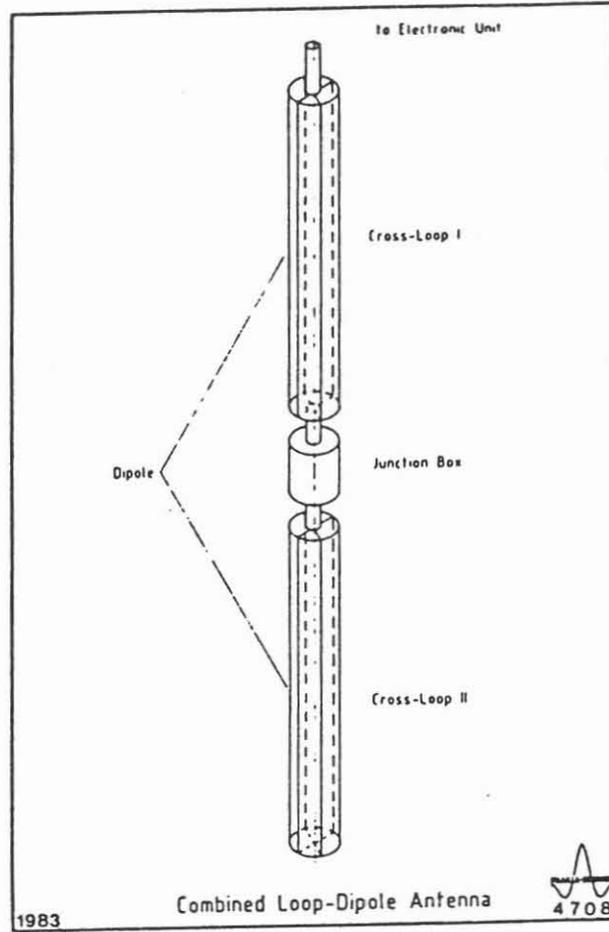


Bild 12: Dipol-Kreuzrahmen Antennenkombination

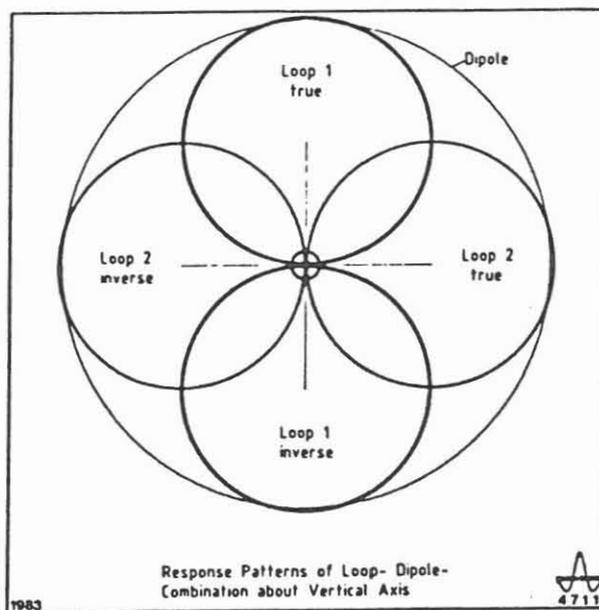


Bild 13: Darstellung der Dipol- und Kreuzrahmen-Richtcharakteristik

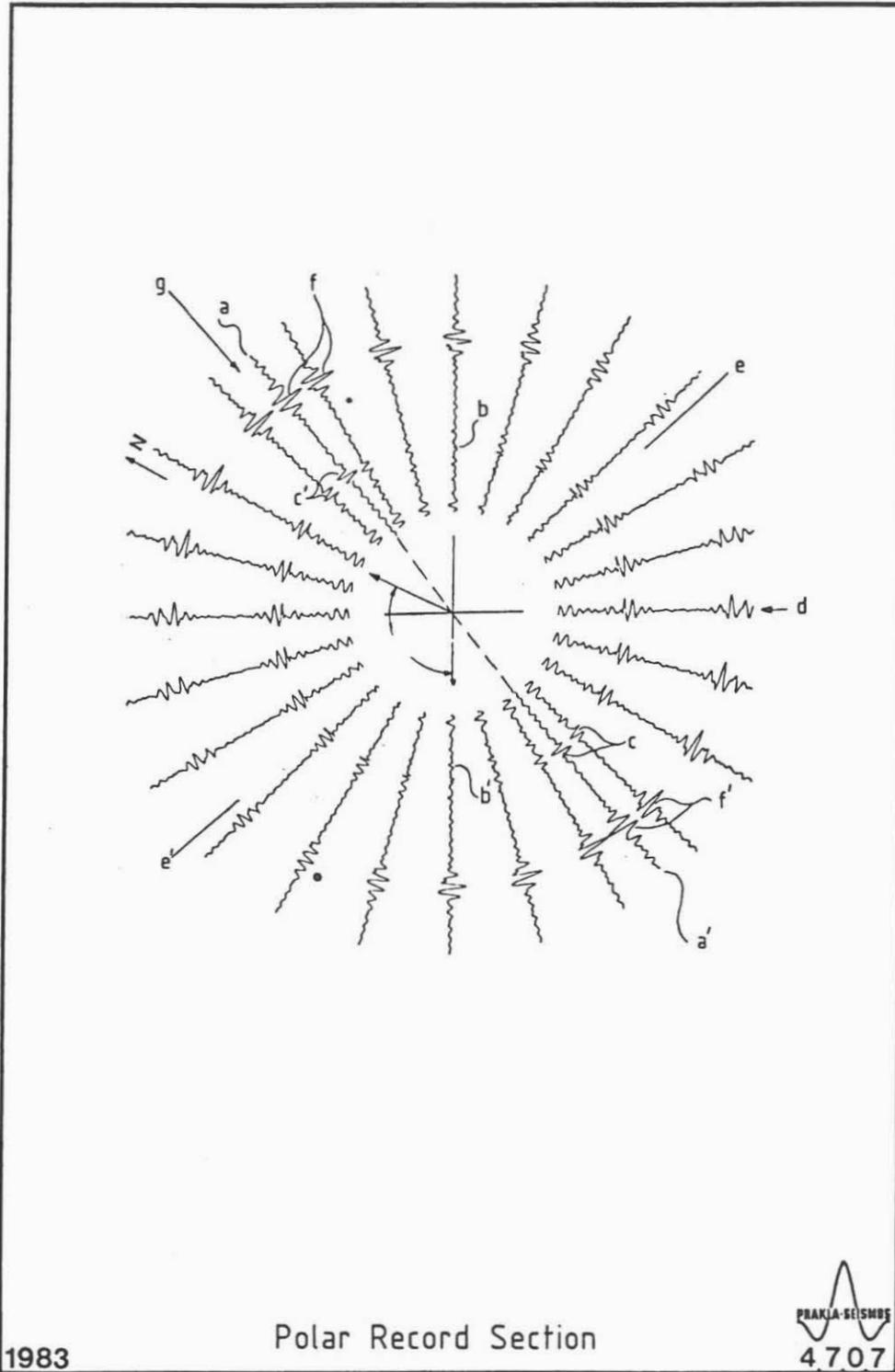


Bild 14: Polare Signaldarstellung

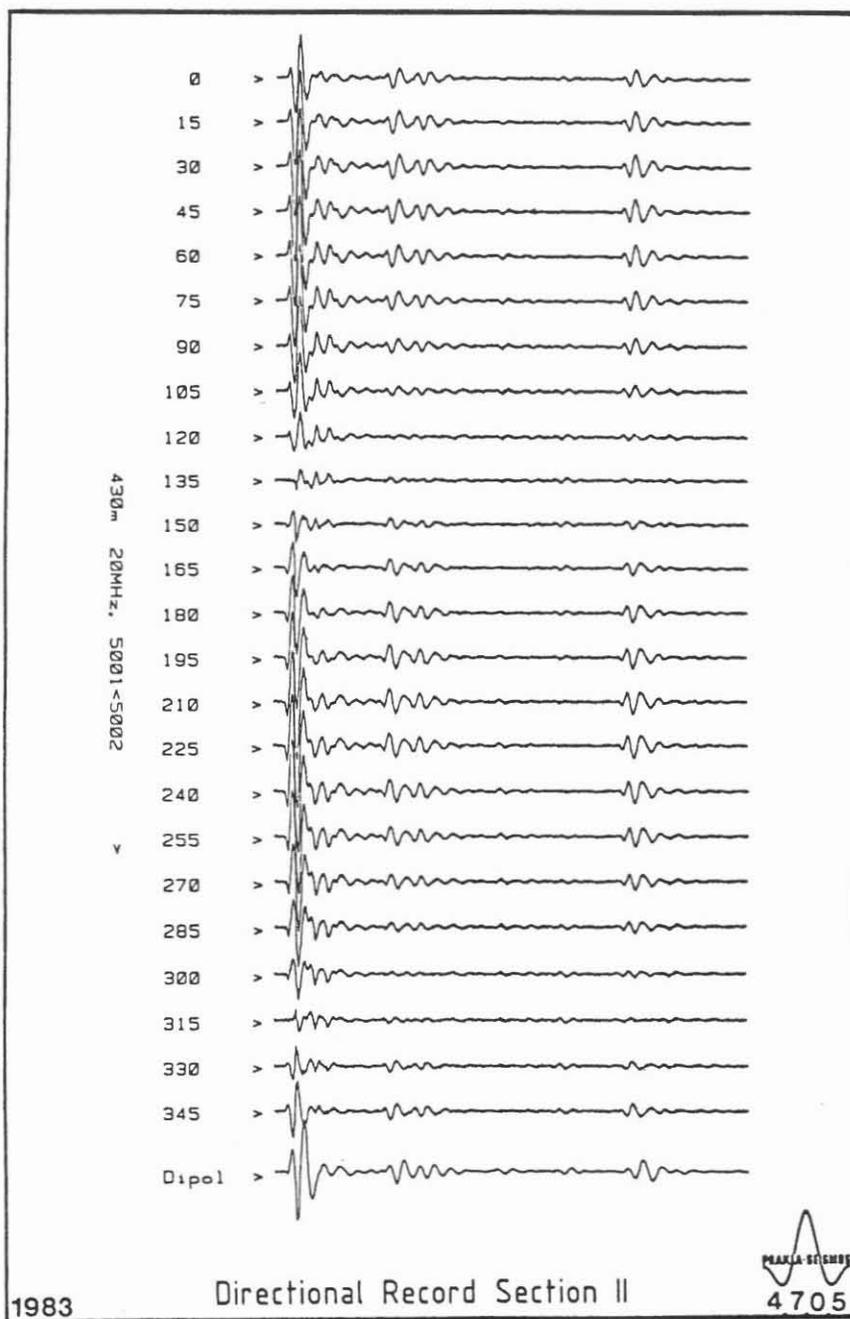


Bild 15: Zeilenweise Darstellung

lungsmessung zwischen den Bohrungen Mardorf 8 und Mardorf 9. Bei dieser Messung war der Sender von der Sonde getrennt und in der Bohrung M 9 separat eingefahren worden, während sich die Empfangssonde jeweils auf gleicher Teufe in der Bohrung M 8 befand. Dargestellt ist der Teufenbereich von 300 - 350 m. Die gesamte Aufnahmedauer beträgt 10 uS. Die Registrierung erfolgte in 5 aufeinanderfolgenden Zeitsegmenten à 2 uS Dauer.

Bild 17 zeigt eine Richtungsauswertung bei 300 m über den Zeitintervall 0 - 2 uS.

Die oberen drei Spuren beinhalten die Korrelationskoeffizienten von Rahmensignal 1 zu Rahmensignal 2, Rahmensignal 1 zu Dipol und Rahmensignal 2 zu Dipol. Der Bereich von Reflexionen verursacht jeweils hohe Korrelationen und gibt dadurch einen Hinweis auf Bereiche brauchbarer Richtungsinformation.

Es folgen dann die Signalaufzeichnungen von Rahmen 1, Rahmen 2 und Dipol.

Darunter folgt eine analoge Darstellung des Peilwinkels über der Aufnahmesegmentzeit. Für die endgültige Festlegung des Azimutwinkels muß der Peilwinkel noch um die Kompaßanzeige korrigiert werden.

Es ist deutlich zu erkennen, daß in Bereichen hoher Korrelation der berechnete Einfallswinkel stabile Werte annimmt.

Bild 18 zeigt eine Winkelsektion aus der gleichen Aufnahme des Tiefenprofiles von 300 - 350 m für den Bereich von 8 - 10 uS. Obwohl die Signale hier schon stark verrauscht sind, ist bei einer Reflexion um 9 uS noch eine starke Korrelation erkennbar. Es ergibt sich auch noch ein eindeutiger Wert mit geringen Toleranzen für den Azimutwinkel der georteten Reflexionselemente.

In Bild 19 ist die richtungszugeordnete Lage dieses Reflexionselementes maßstabgerecht in die Schwerefeldkarte des Salzstockes eingezeichnet. Das annähernd parallel zum Schwerefeld NNW-streichende Element liegt im Bereich der westlichen Salzstockflanke. Der mittlere Abstand des Elementes zu den Meßorten in den Bohrungen beträgt ca. 750 m.

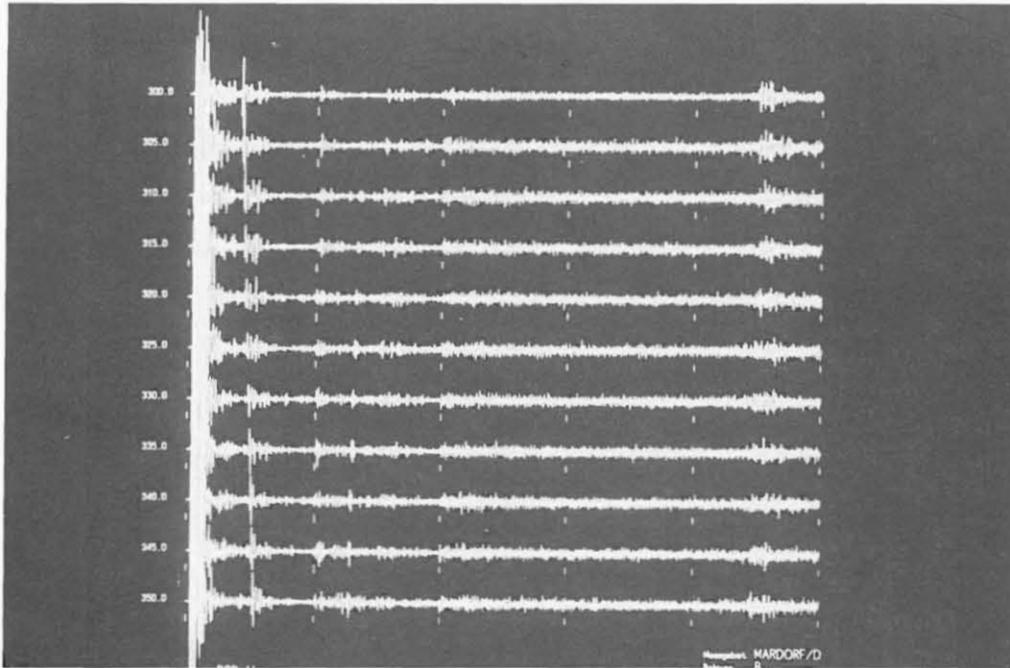


Bild 16: Aufnahmesektion einer Durchstrahlungsmessung

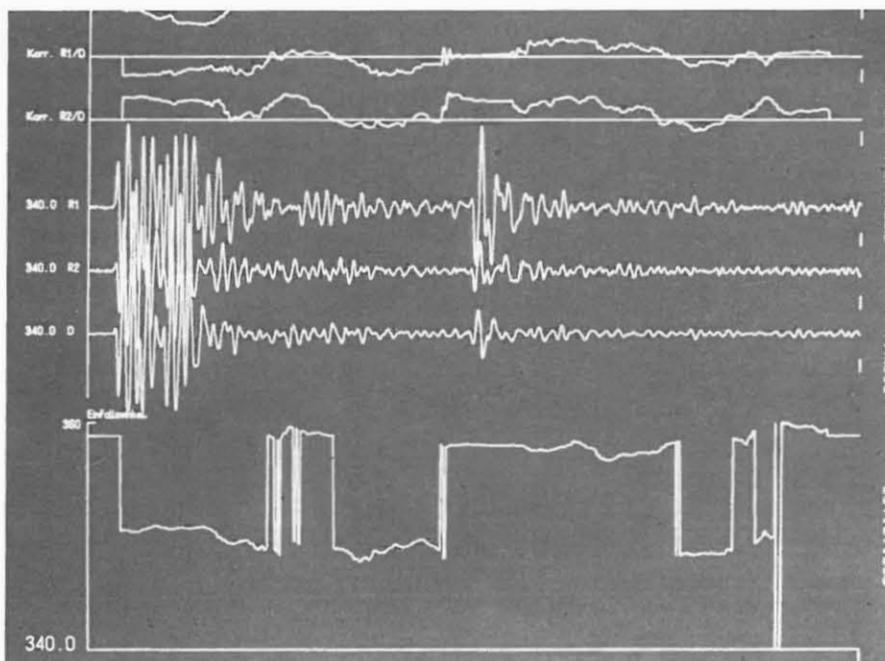


Bild 17: Richtungsauswertung bei 2 μ s

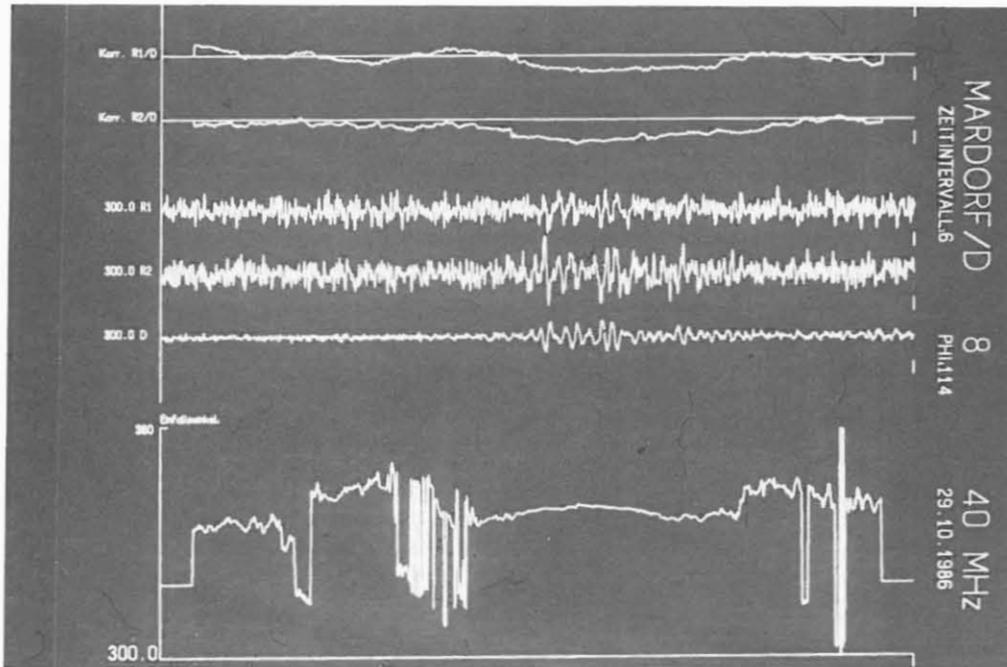


Bild 18: Richtungsauswertung bei 9 μ s

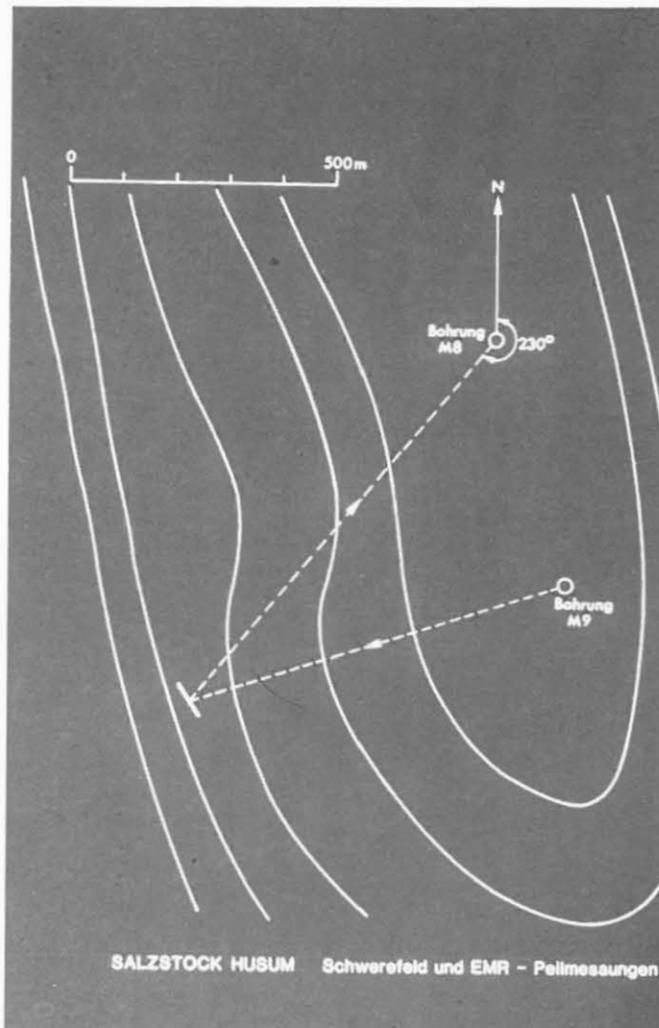


Bild 19: Darstellung eines Reflexionselementes