

NACHRICHTEN AUS DER GESELLSCHAFT

Gerhard-Müller-Kolloquium im Herz-Jesu-Kloster in Neustadt/Weinstraße 16. + 17. Januar 2003

Harro Schmeling, Frankfurt

In der Nacht zum 9. Juli 2002 haben wir unseren guten Freund und Kollegen, Gerhard Müller, verloren. Siehe hierzu auch den Nachruf von Walter Zürn (Mitteilungen der DGG, Nr.3/2002, S. 23). Bis zuletzt hat Gerhard Müller mit seiner ihm eigenen vollen Hingabe geforscht, Vorlesungen gehalten und mit seinen Studenten gearbeitet. Die Mitglieder des Frankfurter Instituts für Meteorologie und Geophysik und viele seiner geophysikalischen Freunde hatten unmittelbar nach seinem Tod das Bedürfnis, ein Gerhard-Müller-Kolloquium im Herz-Jesu-Kloster in Neustadt zu organisieren. Ingrid Hörnchen, Müllers langjährige Sekretärin, und Thomas Forbriger haben daraufhin das Organisatorische in ihre Hände genommen. Ein solches wissenschaftliches Kolloquium würde die richtige Art und Weise sein, Gerhard Müllers Andenken, sein Leben und sein Wirken in der Geophysik zu würdigen. Vor vielen Jahren war es Gerhard Müller, der das Kloster mit seinen damals kargen Zimmern als einen idealen Platz für wissenschaftliche Seminare und Diskussionen entdeckte. Die legendären "Mathematischen Geophysik Seminare" von Müller sind inzwischen von vielen anderen Organisatoren kopiert worden. Dankenswerterweise haben sich eine Reihe von Rednern gefunden, die bereit waren, in ihren Vorträgen eine Retrospektive von Müllers wissenschaftlichen Leistungen und seinem Einfluss in der Geophysik zu geben. Wir denken, dass dies der beste Weg war, von Gerhard Müller Abschied zu nehmen. Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Inhalte der Vorträge referiert. Ein Sonderband mit den ausführlichen Beiträgen der einzelnen Autoren ist in Vorbereitung.

Im ersten Vortrag (Retrospect on first applications of the S reflectivity method) ging Rainer Kind (GFZ Potsdam) auf die von Fuchs und Müller Ende der 60er Jahre entwickelte Reflektivitätsmethode zur Berechnung von synthetischen Seismogrammen ein. Der Artikel von Fuchs und Müller (1971) stellt mit bislang über 500 Zitierungen einen der international meist zitierten deutschen Artikel aus der Geophysik dar. Zusammen mit Kind hatte Müller die Reflektivitätsmethode auf S-Wellen erweitert und dann damit S-Kernphasen synthetisiert. Bei diesen Modellierungen fanden die Autoren theoretische Phasen wie eine SPdiffKS-Phase (an der Kern-Mantel Grenze diffraktiert), die vorher noch nicht beobachtet wurden. Hier haben wir also ein typisches Beispiel, in dem die Theorie vor der Beobachtung stand. In einer aus heutiger Sicht üblichen Seismogrammmontage, die damals aber einen wesentlichen Durchbruch darstellte, fasste Müller global registrierte Seismogramme über teleseismische Entfernungsbereiche zusammen, und konnte dadurch erstmals global alle wichtigen Wellengruppen visualisieren. Diese Seismogrammmontage findet sich heute in vielen Lehrbüchern.

In seinem Vortrag "Seismic waves and complex media" fasste Michael Korn (Leipzig) Müllers Arbeiten zu seismischen Wellenphänomenen in Zufallsmedien zusammen. Diese Arbeiten sind typisch für Müllers kritischen wissenschaftlichen Ansatz. Durch theoretische Berechnungen von Wellenfeldern in synthetischen Medien wollte er aufzeigen, welche Fehlschlüsse möglich sind, wenn man vereinfachte Strahlentheorien anwendet. Es entstanden synthetische Seismogramme von gängigen Erdmodellen, denen eine Zufallsgeschwindigkeitsvariation überlagert war (Korn, 1987). In anderen, eindimensionalen zufalls-geschichteten Medien wurde die durch Reflexion an jeder Schicht auftretende Rückstreuung berechnet (Görich und Müller, 1987). Die dadurch auftretende Amplitudenabnahme der eindringenden Welle ähnelt der Abnahme durch anelastische Dämpfung so stark, dass eine klare Unterscheidung zwischen beiden Effekten aus Beobachtungen alleine nicht möglich ist. Eine Beschreibung der Dämpfung durch Streuung kann ganz analog zur anelastischen

Wellendämpfung vorgenommen werden mit Hilfe von Dämpfungsoperatoren (Fang und Müller, 1991, 1996). In 2D Medien mit zufällig verteilten Geschwindigkeitsfluktuationen berechnete Müller mit seiner Gruppe die Wellenausbreitung und konnte zeigen, dass die Wellenpfade durch Diffraktion länger, ihre Laufzeiten jedoch kürzer als im ungestörten Medium werden. Durch zufällig verteilte Fluktuationen wird das Medium also scheinbar schneller - mit Konsequenzen z. B. für die globale Manteltomographie (Müller, Roth und Korn, 1992; Roth, Müller und Snieder, 1993). Beeindruckend war die Gegenüberstellung von Wellenfronten in Zufallsmedien, die durch Raytracing und durch das volle Wellenfeld berechnet wurden: Während beim Raytracing Wellenfronten zum Teil in chaotischer Weise deformiert werden können, liefert das volle Wellenfeld glattere Wellenfronten mit früheren Einsätzen (Witte, Roth und Müller, 1996). Zufallsverteilte Fluktuationen oberhalb der D"-Schicht benutzten Hock, Roth und Müller (1997) auch in Wellenfeldberechnungen von Pdiff Phasen. Die resultierenden Laufzeitfluktuationen ähneln sehr stark solchen, die durch Geschwindigkeitsvariationen in D" sowie durch Fluktuationen der Kernmantelgrenze hervorgerufen werden können.

Ein weiteres Arbeitsgebiet von Müller war, wie man auch aus dem Titel seiner gleichnamigen Vorlesung schließen kann, die Migration seismischer Wellenfelder. Stefan Buske (FU Berlin) erläuterte in seinem Vortrag "Migration: reconstruction of structures from wavefields" dieses Inversionsproblem: Aus Reflexionselementen von Laufzeitkurven wird auf Reflektorelemente im Untergrund geschlossen. Geometrisch oder durch Wellenfeld-Extrapolation werden dabei die an der Erdoberfläche gemessenen Reflexionselemente an ihren Ursprungsort, den Reflektoren im Untergrund, verschoben oder migriert. Mit der Müller eigenen Sorgfalt kamen verschiedene Methoden zur Anwendung und wurden gegeneinander getestet: Finite-Differenzen-Migration (Temme 1983, 1984), Frequenz-Wellenzahl-Migration (Terefe, Diplomarbeit; Temme und Müller, 1986; Müller und Temme, 1987; Zwieli, Diplomarbeit), sowie Kirchhoff-Migration (Buske, Diplomarbeit; Oye, Diplomarbeit). Die Verfahren wurden sowohl an synthetischen Seismogrammsektionen als auch an beobachteten Daten getestet, wie z.B. an einer Salzkissenstruktur (Emmerich und Müller, 1992) oder am ISO89-3D Datensatz der KTB (Buske, 1999). Auch spezielle theoretische Aspekte wurden behandelt, wie z.B. die Migration von zufallsverteilten Medien (Emmerich et al., 1993) oder die Berücksichtigung von Absorption (Toutou, 1997). Heute werden Müllers Arbeiten zur Migration in vielen Bereichen weiterentwickelt und eingesetzt, beispielsweise an tiefenseismischen Profilen durch die subduzierende Nazcaplatte, bei der vorausschauenden Vorhersage im Tunnelbau oder bei der Abbildung von Strukturen in und unterhalb von stark heterogenen Medien.

Aus Amplituden und Laufzeiten verschiedener tiefer Mantel- und Kernphasen und aus Vergleichen mit synthetischen Seismogrammen versuchte Müller mit vielen seiner Studenten und Kollegen, die tiefe Struktur der Erde weiter einzuschränken. Johannes Schweitzer (NORSAR/Norwegen) gab in seinem Vortrag "Gerhard Müller - Investigations of the Earth Mantle" einen Überblick über diese Arbeiten. Wichtig war hierbei, dass häufig Laufzeitdifferenzen und Amplitudenverhältnisse zweier Phasen benutzt wurden, die ähnliche Laufwege genommen hatten, um so freier von Unsicherheiten des Erdmodells und der Herdlokalisierung zu sein. Die Entwicklung und Anwendung der sogenannten "Earth flattening approximation" ermöglichte die Anwendung von Methoden zur Berechnung theoretischer Seismogramme und Laufzeiten, ursprünglich entwickelt für horizontal geschichtete, ebene Modelle. Mit D. Mayer-Rosa verglich Müller verschiedene Modelle des oberen Erdmantels unter Europa (1971), mit S. Faber (1980, 1984) untersuchte er die Struktur der Diskontinuitäten des oberen Mantels mit Hilfe von an diesen Diskontinuitäten konvertierten Phasen, und in der Diplomarbeit von Th. Schenk (1988; 1989 auch mit W. Brüstle) wurde die unterseitige Reflexion von der Moho (pMP) benutzt, um die Tiefenlage der Moho in der Nähe von Subduktionszonen zu kartieren. Mit seinen Doktoranden H. Mula (1977 auch mit S. Gregeresen; 1980) und J. Schlittenhardt (1984), seinem Diplomanden Th. Spies (Diplomarbeit) und mit W. Kampfmann und H. Emmerich untersuchte Müller in verschiedenen Arbeiten an der Kern-Mantel-Grenze (KMG) reflektierte Phasen. Über die Jahre manifestierte sich das Bild, dass sowohl

beobachtete Amplitudenverhältnisse PcP/P, als auch die Laufzeitdifferenzen PcP-P sehr große Streuungen aufweisen, dass in den Daten geographische Unterschiede zu sehen sind, die nur mit lateralen Heterogenitäten erklärt werden können und dass D'' im Mittel keinen extremen Geschwindigkeitsgradienten aufweist. Als mögliche Ursachen für beobachtete sehr kleine PcP Amplituden wurden Zonen mit erniedrigtem Q (Schlittenhardt, 1986) in D'' und/oder Streueffekte an eventuellen Undulationen der KMG (mit Kampfmann, 1989) modelliert und diskutiert. Ähnliche Effekte von KMG-Undulationen auf ScS Amplituden fand dann H. Emmerich (1993) auch. Mit H. Mula untersuchte Müller Strahlparameter von lanperiodischen Wellen, die an der Kernmantelgrenze entlanggelaufen waren (1980, 1981). Diese zeigten Dispersion, da sie je nach Wellenlänge von unterschiedlich mächtigen Bereichen direkt über der KMG beeinflusst wurden. Mit S. Hock und M. Roth (1997) analysierte Müller den Strahlparameter von Pdiff, um aus Abweichungen vom Standard-Erdmodell auf laterale Heterogenitäten längs der Laufwege zu schließen. Schließlich fasste Schweizer Arbeiten zusammen, bei denen er selber mit Müller zusammengearbeitet hatte: Mit J. Schlittenhardt (1985) wurde in einer Studie die Idee einer globalen Diskontinuität oberhalb von D'' widerlegt, in Schweitzers Diplomarbeit wurden erste Hinweise auf eine großräumige Niedriggeschwindigkeitsanomalie für S-Wellen im untersten Mantel unter dem Pazifik gefunden (1985, 1986), die dann in seiner Dissertation bestätigt und modelliert wurde (1990).

Während in Müllers frühen Skripten und Arbeiten die seismische Dämpfung kaum erwähnt wurde, wandte er sich ihr in den achtziger Jahren in zwei wichtigen Arbeiten intensiv zu (Müller, 1983, 1986). In seinem Vortrag "Anelastizität der Erdmaterie" ging Hans Berckhmer (Frankfurt/Main) auf das fruchtbare Zusammentreffen seiner eigenen experimentellen Arbeiten und Müllers theoretischen Ansätzen zur Frequenzabhängigkeit von Q ein. Zunächst überraschte Berckhmer die Seismologen mit der Aussage, dass eine deterministische Raumwellenseismologie ohne Wellendämpfung gar nicht möglich wäre. Statt, wie in der realen Erde, nach mehreren Stunden vollständig abzuklingen, würde jedes starke Beben in einer Erde ohne Dämpfung auf Dauer ein chaotisches, beliebig komplexes Schwingungsmuster hervorrufen. Durch verschiedene Methoden hatte damals Berckhmer die Frequenzabhängigkeit von Q als Potenzabhängigkeit mit einem Exponenten (etwa 0.25) ermittelt. Müller entwickelte ein theoretisches, viskoelastisches Modell, das lediglich auf Kausalität, Linearität und einem frequenzabhängigen Q (proportional ω^α) basierte. Den zugehörigen Modellkörper nannte Müller den "generalisierten Maxwellkörper". Es gelang Müller, für diesen eine explizite Funktion für den frequenzabhängigen Modul und die frequenzabhängige Viskosität zu finden. Da diese folglich auch die stationäre (langzeitige) Viskosität lieferte, hatte Müller als erster einen auf mathematischen Grundlagen basierenden Zusammenhang zwischen dem seismischen Q und der stationären Viskosität gefunden. Das Modell des generalisierten Maxwellkörpers schließt aber auch das sogenannte Primärkriechen ein, wie dies auch im Experiment beobachtet wird. Unter Ausnutzung dieses Zusammenhangs wendete Müller sein viskoelastisches Modell auf die fennoskandische und kanadische isostatische Hebung an und konnte somit die Hebungsdaten mit einem generalisierten Maxwellkörper mit einem Exponenten α von 0.25 bis 0.3 und entsprechenden stationären Viskositäten von 10^{23} Pa s erklären. Dieser Viskositätswert für den Mantel liegt um etwa eine Größenordnung höher als derjenige für den einfachen Maxwellkörper. Darin sah Müller ein wichtiges Resultat. Mit der Extrapolation auf stationäres Kriechen bei sehr langen Zeiten ändert sich an der Viskosität wenig, aber es wird bei der Vielzahl der möglichen Mikroprozesse die Voraussetzung der Linearität fraglich.

Anfang der 70er Jahre war die Struktur des Inneren und Äußeren Kernes ein heißes Thema. So gab es widersprüchliche Interpretationen zur Struktur der Grenze Innerer/Äußerer Erdkern. Falls man Details des äußersten Inneren Kernes auflösen könnte, könnten diese möglicherweise Hinweise über den Wachstums- oder Kristallisationsprozess des Inneren Kernes liefern. Annie Souriau (Toulouse/Frankreich), die als langjährige Kollegin Müllers auf diesem Gebiet gearbeitet hatte, gab einen Überblick über Müllers Arbeiten über den Kern (Core Studies: The key contribution of Gerhard Müller's group). Um Amplituden und Laufzeiten von Vorläufern von PKP-Phasen zu erklären, hatte Müller (1973a, 1975) durch Vergleich von theoretischen Seismogrammen mit

Beobachtungen erstmals mit Raumwellen die S-Geschwindigkeit im Inneren Erdkern bestimmen und komplexere Schichtungen des unteren Teils des Äußeren Kernes ausschließen können. Mit seinem Doktoranden H. Häge (1979), untersuchte er, ob im äußersten Inneren Kern eine Zone erniedrigter Geschwindigkeiten vorhanden sein könnte, was durch Vergleich von theoretischen Seismogrammen mit Beobachtungen nicht ausgeschlossen werden konnte. Mit Modellierungen durch Müllers Doktoranden, T. Spies (1991), konnten später die PKP Amplituden durch ein Q-Modell des Inneren Kernes erklärt werden. Amplituden- und Laufzeitbeobachtungen von SKKS und SKS zusammen mit R. Kind (1977) ließen scheinbar auf signifikante Stratifikationen innerhalb des flüssigen, äußeren Kernes schließen. Dieses fluiddynamisch problematische Ergebnis untersuchte Müller dann nochmals zusammen mit seinem Diplomanden J. Schweitzer (1984, 1986), und sie konnten zeigen, dass die beobachteten Abweichungen gegenüber Standardmodellen nur in einigen, nicht allen Datensätzen auftraten und durch Heterogenitäten im untersten Mantel erklärt werden konnten. In dieser Zeit zeigte Müller in verschiedenen Untersuchungen von PcP Amplituden zusammen mit H. Mula und S. Gregersen (1977) J. Schlittenhardt (1984) und T. Spies (1985), dass unmittelbar unter der Kern-Mantel-Grenze keine Scherfestigkeit vorhanden ist. Dies war kein triviales Ergebnis, denn es ist grundsätzlich nicht auszuschließen, dass leichtere Beimischungen des Kernes nahe der Kern-Mantel-Grenze ausfrieren. Später untersuchte er dann zusammen mit W. Kampfmann in einer theoretischen Studie den Einfluss von Topographie der Kern-Mantel-Grenze auf PcP Amplituden.

Auf dem Gebiet von Herdprozessen hatte Müller mit seiner Gruppe ebenfalls intensiv gearbeitet. Dabei untersuchte er auch das volumetrische seismische Moment von Explosionen, das auf eine Volumenänderung der Quelle zurückgeführt wird. Müller hatte in einer frühen Arbeit (Müller, 1973b) die Formel $M=(\lambda+2\mu)\delta V$ entwickelt, die das volumetrische Moment M mit einer Änderung δV des Herdvolumens und den Laméschen Konstanten verknüpfte. Über Jahre hinweg war Müller irritiert über eine Diskrepanz zu einer häufig in der Literatur verwendeten Formel $M=(\lambda+2\mu/3)\Delta V$, die scheinbar die gleichen Größen verknüpft, aber mit einem anderen Faktor (Müller, 2001b). Die Autoren beziehen sich dabei auf eine Herleitung im Lehrbuch von Aki und Richards. In seinem Vortrag "On seismic sources characterized by volume changes" analysierte Paul Richards (Palisades/USA) diese Diskrepanz mit dem beruhigenden Ergebnis, dass beide Formeln korrekt sind, Aki und Richards jedoch die Volumenänderung ΔV einer vom Umgebungsdruck entlasteten Herdkugel betrachteten, während Müllers Volumenänderung δV für die unter Umgebungsdruck stehende Kugel gilt. Der Auflösung dieses Problems haben Aki und Richards nun zwei Seiten in der neuen Ausgabe ihres Lehrbuches gewidmet, die Müller noch kurz vor seinem Tod gelesen hat. Müllers Definition beschreibt die tatsächliche Volumenänderung der Quelle und ist somit die logischere Wahl. Der Umgebungsdruck auf die Quelle hat konkrete Konsequenzen. Gleich starke Explosionen erzeugen in größerer Tiefe eine kleinere Änderung des Quellvolumens und somit ein kleineres seismisches Moment. Dies wurde von der Sowjetunion genutzt, um gleichzeitig zu einem tiefen Nukleartest eine schwächere aber flachere, normale, chemische Explosion zu zünden, um so vom Nukleartest abzulenken.

Müllers Interesse galt natürlich nicht nur den volumetrischen Anteilen von Beben. Mit geschickt gewählten mathematischen Ansätzen machte er sich Ende der 70er und Anfang der 80er Jahre auch an die Beschreibung komplexer Herdprozesse aus teleseismischen Signalen. Wolfgang Brüstle (Freiburg) berichtete in seinem Vortrag "Die Bruchausbreitung im Erdbebenherd: kinematische Beschreibung, Größe und Dauer des Bruchvorganges" über diese Untersuchungen. Um theoretische Seismogramme für einfache und komplexe Quellen zu berechnen, generierte Müller eine praktisch zu handhabende Herd-Funktion, die unter Eingeweihten seitdem "Müller-Impuls" genannt wird. Den Schritt von Punktquellen zu ausgedehnten Herden vollzog Müllers damaliger Doktorand Brüstle durch die Einführung von Linienquellen und Flächenquellen mit wandernder Quellfunktion. Der hier realisierte Richtungseffekt (directivity effect) führt zu unterschiedlich lang dauernden Raumwellensignalen mit stark asymmetrischen Abstrahlcharakteristiken. Mit dem Verfahren konnten einfache und komplexe Bruchgeometrien simuliert werden. Insbesondere wurden Start-,

Beschleunigungs- und Stopphasen benutzt, um den räumlichen und zeitlichen Verlauf des Bruches zu rekonstruieren. Brüstle zeigte als Anwendungsbeispiele die Untersuchungen der Beben in Bukarest (4.3.1977), Peru-Bolivien (15.8.1963), Kurilen (6.12.1978) u.a. Die Erklärung komplexer Herdvorgänge ist in Material- und Spannungsheterogenitäten im Herdgebiet zu suchen (Asperity- und Barrier-Modell).

Ein ganz anderes Forschungsgebiet betrat Müller Anfang der 90er Jahre. In seinem Vortrag "Rückblick auf Experimente zur 5. Kraft und die Gravitationskonstante" referierte Walter Zürn (Schiltach) über Müllers und seine Versuche, die 5. Kraft experimentell nachzuweisen, oder besser gesagt, vorausgegangene, angeblich signifikante Messergebnisse zu widerlegen. Die 5. Kraft wurde von theoretischen Physikern als neue Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen postuliert, wobei sie eine effektive Reichweite von größenordnungsmäßig 1000 m haben konnte. Ihre Wirkung sei ähnlich der Gravitation, wobei jedoch die Wechselwirkung von der Art der Materie selbst und/oder dem Abstand abhängen soll. Man kann die 5. Kraft mit der Gravitation zusammenfassen, wobei dann die effektive Gravitationskonstante eine von der Entfernung abhängige Größe wird. Im Entfernungsbereich 200m wären dann Änderungen in G von 2 % zu erwarten. Auslöser für eine ganze Reihe von unterschiedlichen G -Bestimmungen weltweit waren Schweremessungen von Stacey in einem Bergwerk, die angeblich eine Entfernungsabhängigkeit zeigten. Müller stand diesen Messungen skeptisch gegenüber, die von Stacey verwendeten Dichten könnten gar nicht genau genug bekannt gewesen sein. In Walter Zürn fand Müller genau den richtigen Partner, seine Skepsis durch genaue G -Messungen zu untermauern. So führten Müller und Zürn zusammen mit Geodäten unter und über einem künstlichen Staubecken im Schwarzwald, dem Hornbergbecken, genaueste Schweremessungen mit 6 Gravimetern durch. Hierbei wurde die Gravitationswirkung einer zeitlich quasiperiodisch variierenden Wasserschicht von bis zu 22 m Mächtigkeit bestimmt. Die Benutzung von 6 statt einem Gravimeter erwies sich als sehr glücklich, denn diese 6 Messungen erlaubten eine realistische Bestimmung des Fehlerbalkens, der bei nur einem Gravimeter kleiner ausgefallen wäre und dadurch eine signifikante Abweichung vom allgemein bekannten G aus Labormessungen vorgetäuscht hätte. Mit den 6 Gravimetern konnten Müller und Zürn zeigen, dass alle Messungen mit ihren Fehlern immer noch im Bereich des bisherigen Laborwertes lagen, und im Längenbereich 50 m keine Abweichung vom Newtonschen Gravitationsgesetz zu beobachten ist. Diese Seemessungen füllten damit eine wichtige Lücke bei der Einschränkung von G für einen Entfernungsbereich einiger Dekameter. Eine Zusammenfassung aller wichtigen G -Bestimmungen findet man bei Fishbach und Talmadge (1999). Mit den dort referierten Messungen ist das Problem einer möglichen Entfernungsabhängigkeit von G jedoch nicht gelöst. So ist beispielsweise derzeit vollkommen ungeklärt, warum die Pioneer-Sonden, die gerade unser Sonnensystem verlassen, bei diesen großen Entfernungen eine Abbremsung erfahren, die nicht mit Newtons Gravitationsgesetz alleine zu erklären ist. Außerdem erlauben moderne Stringtheorien neue schwereähnliche Wechselwirkungen im Submillimeterbereich. Die Suche ist nicht zu Ende.

Besonderen Spaß machten Müller seine "Küchenexperimente" die er, angeregt durch SFB-Planungen in Frankfurt zum Thema Musterbildung, Mitte der 90er Jahre begann. Der SFB ist nie eingerichtet worden, was Müller jedoch nicht davon abbrachte, das Thema intensiv zu erforschen und eine Reihe wichtiger Veröffentlichungen zu produzieren (Müller, 1998a & b, 2001a; Müller und Dahm, 2000). Torsten Dahm (Hamburg) berichtete in seinem Vortrag "Gerhard Müllers Küchengeophysik" über diese Forschungen. Durch Analogexperimente mit neuartigen Techniken und Materialien aus dem Lebensmittelbereich untersuchte Müller die Prozesse der Rissbildung, der Risswechselwirkung und der Bruchflächen-Morphologie. Das Grundkonzept dieser Experimente bestand im kontrollierten Austrocknen einer einige cm dicken, mit Wasser angerührten Stärkeschicht. Durch Wasserentzug kontrahiert die Schicht und es bilden sich Zugrisse der sogenannten 1. Generation. Diese breiten sich, wie Müller mit einer Videokamera beobachtete, mit Geschwindigkeiten von einigen cm/s aus. Schaut man sich die Bruchflächen dann im Detail an, so erkennt man morphologische Strukturen, sogenannte "plumose lines", die offensichtlich die

fortschreitende Bruchausbreitung dokumentieren. Müller entwickelte ein Inversionsverfahren, um aus der Verteilung der plumose lines die Bruchgeschwindigkeit und -geschichte über die gesamte Bruchfläche zu invertieren. Interessant sind die aufgezeigten Parallelen zwischen diesen plumose lines und seismischen Strahlen. Trocknet die Schicht dann weiter aus, so bildet sich nahe der Oberfläche die 2. Generation von Zugrissen in einem irregulären Muster, das in Form von polygonalen Säulen langsam nach unten wächst. Müller fand dabei heraus, dass die Dicke der Säulen durch den Austrocknungsgradienten kontrolliert wird. Diese Ergebnisse lassen sich direkt auf auskühlende Lavaströme übertragen, bei denen man ebenfalls Basaltsäulen beobachtet, die während des Erstarrens offensichtlich in Richtung des Temperaturgradienten wachsen, und deren Breite mit abnehmendem Temperaturgradienten zunimmt.

Der Bogen um Müllers geophysikalisches Wirken schloss sich durch eine persönliche Retrospektive von Karl Fuchs (Karlsruhe) über die gemeinsame Entwicklung und die Ursache des Erfolges der Reflektivitätsmethode ("The reflectivity method - a success story"). Die aufstrebenden 60er Jahre bereiteten für die beiden, damals jungen Wissenschaftler Müller und Fuchs den idealen Boden für eine fruchtbare Zusammenarbeit. Sie kombinierten Müllers Strahlentheorie für Punktquellen mit Fuchs' Vorläufer der Reflektivitätstheorie. In dieser Zeit wurde erstmals auf breiter Front der Europäische Untergrund seismologisch erkundet, hierzu gab es ein DFG- Schwerpunktprogramm. Eine wesentliche, nicht zu unterschätzende Voraussetzung für die Frage nach reflektierten Wellenfeldern war der damals wichtige Schritt vom einfachen, optischen Picken von Einsatzzeiten und anschließender Darstellung als Punkte in einem Laufzeitdiagramm zur viel aussagekräftigeren Seismogrammmontage. Erstmals erkannte man in einer solchen Montage, dass nicht nur Einsatzzeiten, sondern ganze Wellenpakete korreliert waren. Diese Darstellung machte sich Müller zu Nutzen für seine "Theoretischen Seismogramme für Punktquellen in geschichteten Medien", wie der Titel seiner Dissertation in Clausthal hieß. Das berühmte synthetische "Müller Signal" wurde hier an der Punktquelle generiert, daraus die verschiedenen Reflexionen an den Grenzschichten berechnet, und diese dann zu einem synthetischen Seismogramm überlagert. Solche Rechnungen waren erstmals möglich, da die ersten Computer an Universitäten Einzug gehalten hatten. Die Programmiersprache war ALGOL. Unabhängig davon modellierte Fuchs den Einfall und die Reflexion von ebenen Wellen an einem Stapel von Schichten unterschiedlicher akustischer Impedanz und präsentierte diese Modelle in Clausthal, sowie auf der Mathematical Geophysics Conference in Tokyo 1968. Ein Problem bei diesen Rechnungen war, dass noch keine freie Oberfläche berücksichtigt wurde. Müller und Fuchs kombinierten daraufhin ihre Ansätze, führten eine freie Oberfläche und ein geschichtetes Medium oberhalb der eigentlichen, reflektiven Schichten ein und verfassten damit einen der meist zitierten seismologischen Artikel (Fuchs und Müller, 1971). In diesem Artikel wurde die Methode dann auch auf reale Daten angewendet. Was war der Grund für den durchschlagenden Erfolg dieser Methode? Es war letztlich das glückliche Zusammentreffen verschiedener Umstände: zwei junge Wissenschaftler trafen in einem neuen Klima der nationalen, aber auch internationalen Kooperation aufeinander, gerade als die technische Entwicklung eine wissenschaftliche Nutzung der ersten Großrechenanlagen erlaubte. Die freie Kommunikation mit anderen Seismologen und das freie zur Verfügungstellen des Programmes (in Form von Lochkarten) taten ihr Übriges, nicht zuletzt zur effektiven Ausmerzung von bugs.

In all diesen Vorträgen des ersten Kolloquiumstages ist es den Referenten hervorragend gelungen, umfangreiche wissenschaftliche Recherchen mit persönlichen Erfahrungen aus ihrer eigenen Zusammenarbeit mit Gerhard Müller zu verknüpfen und dadurch umfassend und spannend Müllers Arbeiten abzudecken. In den folgenden Vorträgen und Posterpräsentationen des nächsten Tages wurden dagegen hauptsächlich aktuelle Forschungen zu allgemeineren seismologischen Themen vorgestellt. Sie werden hier nur kurz zusammengefasst.

In seinem Vortrag "Heterogeneity in the mantle" zeigte Brian L. Kennett (Canberra/Australien) kombinierte tomographische Inversionen nach der Schergeschwindigkeit und der hydrodynamischen Geschwindigkeit für ausgewählte Subduktionszonen. Eklatante Unterschiede in beiden Größen in der Übergangszone und darunter fordern nach gesteinsphysikalischen

Interpretationen. Jörg Schlittenhardt (BGR Hannover) zeigte in seinem Vortrag "Amplitude Studies of Core Phases" Array Analysen von Kernphasen, die auf eine Zone erniedrigter Geschwindigkeiten oberhalb der Inneren Kerngrenze hindeuteten. Matthias Zillmer (GEOMAR, Kiel) präsentierte in seinem Vortrag "Seismic reflections from the crystalline crust at the KTB site" Berechnungen von Reflexionskoeffizienten der schräg unter die KTB Bohrung einfallenden Fränkischen Störung sowie des Erbdorferkörpers. Thomas Spies (BGR Hannover) berichtete in "Acoustic emission measurements - small-scale seismology in rock mechanics and material testing" über Untersuchungen akustischer Emission im Salzgestein des Endlagers Morsleben, mit denen räumlich-zeitliche Variationen der Mikrorissbildung im Umfeld der untertägigen Abbauen erfasst werden. Michael Roth (Norsar, Norwegen) stellte in seinem Beitrag "Automatische Lokalisierung mikroseismischer Ereignisse" eine Methode zur automatischen Detektierung von induzierter Seismizität durch Hydrofracturing vor, wobei ein Clustering in einer Fläche, also einem Fault, beobachtet wurde. Erhard Wielandt (Stuttgart) griff in seinem Vortrag "What does the moment tensor tell about volume changes" die Frage vom Vortrag auf, und zeigte, dass die aus dem seismischen Moment abgeleitete Volumenänderung kritisch von der geometrischen Wahl des Herdvolumens abhängt. Aufgrund des isotropen Anteils des Momententensors allein ist nicht einmal eine Aussage über das Vorzeichen der tatsächlichen Änderung des Quellvolumens möglich. Nach diesem Vortrag war ursprünglich ein Vortrag von Günter Bock vorgesehen gewesen. Günter Bock ist am 6.11.2002 bei einem Flugzeugabsturz ums Leben gekommen. Aus diesem Anlass sprach Rainer Kind einige persönliche Worte über seinen langjährigen Freund und Kollegen.

In der anschließenden Postersession wurden die Poster "Upper-Rhine-Graben, strong motion seismic network in Germany and France" von Wolfgang Brüstle (Freiburg), "East Asian mantle structure from shear and surface waveforms" von Wolfgang Friederich (Frankfurt/Main), "Beiträge des SZGRF zur seismologischen Forschung mit Breitbanddaten" von Klaus Klinge (Erlangen), und "Synthetische Seismogramme einer Meteoritenexplosion" von Stefan Stange (Freiburg) vorgestellt.

In der abschließenden Sitzung diskutierte Thomas Forbriger (Frankfurt/Main) in seinem Vortrag "Dynamics of the hammer blow" die Kraft-Zeitfunktion der Hammerschlagseismik. Michael Weber (GFZ Potsdam) fasste in "DESERT - an interdisciplinary study of the dead sea transform" die Ergebnisse der verschiedenen seismischen, seismologischen und magnetotellurischen Messungen längs und quer zur Transformverwerfung durch das Tote Meer zusammen und zeigte Ähnlichkeiten und Unterschiede zur San Andreas Verwerfung auf. Im abschließenden Vortrag "Gerhard Müller's kitchen geophysics continued: Cooling features of Icelandic lavas" ging Wolfgang Jacoby in einer ästhetisch ansprechenden Serie von Fotos auf Abkühlungsstrukturen, also Basaltsäulen, auf Island ein und stellte überzeugend die Äquivalenz zu Müllers austrocknenden Stärkesäulen dar. Er begeisterte uns so mit jenen Strukturen, die es Gerhard Müller leider versagt geblieben waren, mit eigenen Augen zu sehen.

Das Kolloquium hatte einen traurigen Anlass. Doch führten uns die wissenschaftlich äusserst interessanten Vorträge dieser beiden Tage die beeindruckende Vielseitigkeit von Gerhard Müllers geophysikalischem Wirken vor Augen. Und es bot die besondere Gelegenheit zur Begegnung vieler seiner ehemaligen Schüler und Kollegen. Sein Werk und seine Persönlichkeit werden unvergessen bleiben.

Danksagung

Ein herzlicher Dank geht an Thomas Forbriger und alle Redner des Kolloquiums, die durch ihre kritische Durchsicht diesen Bericht wesentlich verbessert haben. I thank Ingrid Hörnchen for typing the manuscript.

Literaturliste

- Buske, S., 1999: Three-dimensional Kirchhoff migration of deep seismic reflection data, *Geophys. J. Intern.*, 137, 243-260
- Emmerich, H., 1992: Erprobung der schnellen Frequenz-Wellenzahl- Migration an reflexionsseismischen Daten, Interner Bericht zum Industrieprojekt mit Deilmann-Erdöl-Erdgas
- Emmerich, H., 1993: Theoretical study on the influence of CMB topography on the core reflection ScS, *Phys. Earth Planet. Int.*, 80, 125-134
- Emmerich, H., Zwieliich, J., Müller, G., 1993: Migration of synthetic seismograms for crustal structures with random heterogeneities, *Geophys. J. Intern.*, 113, 225-238
- Faber, S., Müller, G., 1980: Sp phases from the transition zone between upper and lower mantle, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 2, 487-508
- Faber, S., Müller, G., 1984: Converted phases from the mantle transition zone observed at European stations, *J. Geophys.*, 54, 183-194
- Fang, A., Müller, G., 1996: Attenuation operators and complex wave velocities for scattering in random media, *Pure Appl. Geophys.* 148, 269-285
- Fang, Y., Müller, G., 1991: Seismic-wave attenuation operators for arbitrary Q, *Geophys. J. Int.*, 106, 703-707
- Fishbach, E., Talmadge, C.L., 1999: *The Search for Non-Newtonian Gravitation*. Springer, New York, 355 pp.
- Fuchs, K., Müller, G., 1971: Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations, *Geophys. J.R.A.S.* 23, 417-433
- Görich, U., Müller, G., 1987: Apparent and intrinsic Q: the one-dimensional case, *J. Geophys.*, 61, 46-54
- Hock, S., Roth, M., Müller, G., 1997: Long-period ray parameters of the core diffraction P_{diff} and mantle heterogeneity, *J. Geophys. Res.* 102, 17843-17856
- Kind, R., Müller, G., 1977: The structure of the outer core from SKS amplitudes and traveltimes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 67, 1541-1554
- Korn, M., 1987: Computation of wavefields in vertically inhomogeneous media by a frequency domain finite-difference method and application to wave propagation in earth models with random velocity and density perturbations, *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 88, 345-377
- Mula, A.H., Müller, G., 1980: Ray parameters of diffracted long period P and S waves and the velocities at the base of the mantle, *Pure Appl. Geophys.*, 118, 1272-1292
- Müller, G., 1973a: Amplitude studies of core phases, *J. Geophys. Res.*, 78, 3469-3490
- Müller, G., 1973b: Seismic moment and long-period radiation of underground nuclear explosions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 63, 847-857
- Müller, G., 1975: Aufbau und Zustand des Erdkerns, *Physikalische Blätter*, 31, 246-256, 309-315
- Müller, G., 1983: Rheological properties and velocity dispersion of a medium with power law dependence of Q on frequency, *J. Geophys.*, 54, 20-29
- Müller, G., 1986: Generalized Maxwell bodies and estimates of mantle viscosity. *Geophys. J.R.A.S.*, 87, 1113-1141
- Müller, G., 1998a: Starch columns: analog model for basalt columns, *J. Geophys. Res.* 103, 15239-15253
- Müller, G., 1998b: Experimental simulation of basalt columns, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 86, 93-96
- Müller, G., 2001a: Experimental simulation of joint morphology, *J. Struct. Geol.* 23, 45-49
- Müller, G., 2001b: Volume change of seismic sources from moment tensors, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 880-884
- Müller, G., Dahm, T., 2000: Fracture morphology of tensile cracks and rupture velocity, *J. Geophys. Res.* 105, 723-738
- Müller, G., Mayer-Rosa, D., 1971: Theoretical seismograms for models of the upper mantle in Europe, *Proceedings of the XIIth General Assembly of the European Seismological Commission at Luxembourg*, 64-70
- Müller, G., Mula, A.H., Gregersen, S., 1977: Amplitudes of long-period PcP and the core-mantle boundary, *Phys. Earth Planet. Int.*, 14, 30-40
- Müller, G., Roth, M., Korn, M., 1992: Seismic-wave traveltimes in random media, *Geophys. J. Int.*, 110, 29-41
- Müller, G., Temme, P., 1987: Fast frequency-wavenumber migration for depth dependent velocity, *Geophysics*, 52, 1483-1491
- Roth, M., Müller, G., Snieder, R., 1993: Velocity shift in random media, *Geoph. J. Int.*, 115, 552-563

- Schenk, Th., 1988: Die an der Moho reflektierte pP-Vorläuferphase pMP – Beobachtungen und Krustenuntersuchungen, Diplomarbeit, Universität Frankfurt am Main
- Schenk, Th., Müller, G., Brüstle, W., 1989: Long-period precursors to pP from deep-focus earthquakes: the Moho underside reflection pMP, *Geoph. J. Int.*, 98, 317-327
- Schlittenhardt, J., 1984: Array-Untersuchungen von reflektierten und diffraktierten Kernphasen, Dissertation, Universität Frankfurt am Main
- Schlittenhardt, J., 1986. Investigation of the velocity- and Q-structure of the lowermost mantle using PcP/P amplitude ratios from arrays at distances of 70°-84°, *J. Geophys.*, 60, 1-18
- Schlittenhardt, J., Schweitzer, J., Müller, G., 1985: Evidence against a discontinuity at the top of D", *Geophys. J.R.A.S.*, 81, 295-306
- Schweitzer, J., 1990: Untersuchungen zur Geschwindigkeitsstruktur im unteren Erdmantel und im Bereich der Kern-Mantel-Grenze unterhalb des Pazifiks mit Scherwellen. Dissertation, Universität Frankfurt am Main
- Schweitzer, J., Müller, G., 1986: Anomalous difference traveltimes and amplitude ratios of SKS and SKKS from Tonga-Fiji events, *Geophys. Res. Letters*, 13, 1529-1532
- Spies, Th., 1991: Untersuchung der Struktur in der Nähe der Grenze zum inneren Kern mit PKP-Phasen. Dissertation, Universität Frankfurt am Main
- Temme und Müller, 1986: Fast plane-wave and single-shot migration by Fourier transform. *J. Geophys.*, 60, 19-27
- Temme, P., 1983: Rekonstruktion von seismischen Reflektoren - Grundlagenuntersuchungen an synthetischen Seismogrammen, Dissertation, Universität Frankfurt am Main
- Temme, P., 1984: A comparison of common-midpoint, single-shot and plane-wave depth migration. *Geophysics*, 49, 1896-1907
- Toutou, C., 1997: Berücksichtigung von Absorption bei der Migration seismischer Daten. Dissertation, Universität Frankfurt am Main
- Witte, O., Roth, M., Müller, G., 1996: Raytracing in random media, *Geoph. J. Int.* 124, 159-169

