

# Spuren des Plumes und Strukturen des oberen Mantels unter Hawaii abgeleitet aus konvertierten Wellen

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
in der Fachrichtung Geophysik

eingereicht im  
Fachbereich Geowissenschaften  
der Freien Universität, Berlin

von

**Ingo Wölbern**

Oktober 2003

Gutachter:

Prof. Dr. Rainer Kind (Freie Universität Berlin)

Priv. Doz. Dr. Günter Asch (Freie Universität Berlin)

Tag der Disputation: 15. Dezember 2003

...to boldly go, where no man has gone before...  
(*Gene Roddenberry*)



# Überblick

Hawaii gehört zu den bekanntesten Beispielen für Hotspot-Vulkanismus weltweit. Die von weiteren tektonischen Einflüssen isolierte Position inmitten des Pazifischen Ozeans macht Hawaii zu einem interessanten Untersuchungsobjekt auf dem Gebiet der Mantelplumes. Weder die Entstehungstiefe noch die genaue Lage des Plumeschlauches im Erdmantel sind bislang genau bekannt - Fragen, deren Beantwortung auch neue Erkenntnisse bezüglich der dynamischen Prozesse des Mantels, wie etwa der Konvektion, liefern könnte.

In dieser Arbeit soll die Methode der *Receiver Functions* angewendet werden, um die Strukturen bis in den obersten Teil des unteren Mantels unter Hawaii zu untersuchen. Zur Auswertung standen Daten von elf temporären Breitbandstationen auf den vier größten Hawaii-Inseln zur Verfügung, welche im Zeitraum von Juni bzw. November 1999 bis Mai 2001 kontinuierlich registrierten, sowie zusätzliche Daten permanenter Breitbandstationen. Die Untersuchung ergab eine Reihe von neuen Ergebnissen der seismischen Struktur in verschiedenen Tiefenbereichen. In Übereinstimmung mit früheren Studien konnte die Moho in Tiefen zwischen 12 - 17 km beobachtet werden. Im jüngeren Teil der Inselkette, von Big Island bis etwa Oahu, tritt zusätzlich eine sehr starke Konvertierte auf, die innerhalb der Kruste erzeugt wird und zum jüngeren Bereich hin systematisch früher auftritt.

Deutlich ausgeprägt erscheint im Messgebiet die Lithosphären-Asthenosphären-Grenze. Der langfristige Einfluss des Plumes bewirkte eine Ausdünnung der Lithosphäre im älteren Teil der Inselkette. Innerhalb der Asthenosphäre wurde eine lokale Niedriggeschwindigkeitszone unterhalb von Big Island nachgewiesen, deren Ursprung ebenfalls mit dem Plume in Verbindung gebracht wird. Die Diskontinuitäten der Mantelübergangszone in 410 km und 660 km Tiefe konnten klar identifiziert werden. Stellenweise konnten außerdem konvertierte Phasen aus 520 km sowie aus größeren Tiefen beobachtet werden. Anhand der Ankunftszeiten der  $P_{410s}$  und  $P_{660s}$  konnte das Messgebiet in drei Regionen unterteilt werden: Der Südosten der Inselkette bis zur Mitte von Big Island zeigt keinerlei Einflüsse des Plumes, während der nordwestliche Teil auf reduzierte S-Wellengeschwindigkeiten im oberen Mantel schließen lässt. Südwestlich von Big Island jedoch weist eine deutliche Ausdünnung der Mantelübergangszone auf die Position des Plumes hin. Für dessen Kernbereich wurde ein Radius von etwa 120 km ermittelt.



# Abstract

Hawaii is one of the best known examples of hotspot-volcanism worldwide. Due to its insulated position in the central Pacific ocean, far away from further tectonic influences, Hawaii is a most interesting site for investigations related to mantle plumes. So far, neither the depth of the source region nor the exact position of the plume conduit within the mantle are well known. Answers to these questions may lead to new conclusions regarding dynamical processes as e.g. mantle convection.

In this work the *receiver function* method is used to investigate seismic structures down to the uppermost part of the lower mantle underneath Hawaii. Data have been recorded continuously between June respectively November 1999 until May 2001 at eleven temporary broadband stations on the four biggest of the Hawaiian islands. Additional data have been available from permanent broadband stations. Several results have been obtained for various depths. In agreement with previous publications the Moho has been found in a depth range from 12 to 17 km. In the younger part of the island chain from Big Island approx. to Oahu an additional very strong converted phase occurs, which is generated within the crust. This conversion systematically occurs at earlier times in the younger area.

A pronounced conversion is generated at the lithosphere-asthenosphere boundary in the area under investigation. The longterm influence of the plume leads to thinning of the lithosphere in the older part of the island chain. Underneath Big Island, within the asthenosphere, a local low velocity zone has been verified with its origin related to the plume. Converted phases from the discontinuities of the mantle transition zone in 410 km and 660 km depth have been clearly identified. Sporadically conversions have also been observed generated from the 520-km-discontinuity or deeper.

On the basis of the  $P_{410S}$  and  $P_{660S}$  travel times the whole region could be divided into three different areas: The southeastern part of the island chain shows no influences of the plume at all, while in the northwestern part reduced S-wave velocities are observed in the upper mantle. But southwest of Big Island pronounced thinning of the mantle transition zone points out the position of the plume conduit, which shows a hot core zone of about 120 km radius.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Die Methode der <i>Receiver Functions</i></b>	<b>5</b>
2.1	P-S-Konversionen . . . . .	6
2.2	Grundschrirte der Datenverarbeitung . . . . .	8
2.2.1	Aufbereitung der Rohdaten . . . . .	8
2.2.2	Rotation . . . . .	9
2.2.3	Dekonvolution . . . . .	11
2.2.4	Auflösungsvermögen . . . . .	12
2.3	Laufzeitkorrektur . . . . .	13
2.4	Summationstechniken und Bootstrap-Methode . . . . .	16
2.5	Inversion von <i>Receiver Functions</i> . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Der Aufbau der Erde</b>	<b>19</b>
3.1	Zusammensetzung . . . . .	19
3.2	Seismische Diskontinuitäten . . . . .	22
3.2.1	Krustenphasen . . . . .	23
3.2.2	Die Lithosphären-Asthenosphären-Grenze . . . . .	23
3.2.3	Die Lehmann-Diskontinuität . . . . .	25
3.2.4	Die Mantelübergangszone . . . . .	26
3.2.5	Diskontinuitäten des unteren Mantels . . . . .	28
3.3	Mantelplumes . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Das Untersuchungsgebiet</b>	<b>33</b>
4.1	Der Hawaii-Hotspot . . . . .	33
4.1.1	Vulkanismus . . . . .	34
4.1.2	Die Inselkette . . . . .	36
4.1.3	Die Hawaiischwelle . . . . .	39
4.2	Datenmaterial . . . . .	40

4.2.1	Das Hawaii-Plume-Projekt . . . . .	41
4.2.2	Datenauswahl . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Auswertung und Interpretation</b>	<b>45</b>
5.1	Untersuchungsergebnisse . . . . .	45
5.1.1	Die Krusten-Mantel-Grenze . . . . .	46
5.1.2	Gutenberg-Diskontinuität . . . . .	54
5.1.3	Niedriggeschwindigkeitszone unter Big Island . . . . .	58
5.1.4	Lehmann-Diskontinuität und Mantelübergangszone . . . . .	61
5.1.5	weitere Diskontinuitäten . . . . .	78
5.2	Diskussion und Interpretation . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>91</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>95</b>
<b>A</b>	<b>Liste der verwendeten Beben</b>	<b>111</b>
<b>B</b>	<b>Stationsliste</b>	<b>123</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Hawaii-Imperator-Rücken . . . . .	1
2.1	Konversionen und Multiple . . . . .	7
2.2	Datenbeispiel zur Restitution . . . . .	8
2.3	Strahlorientiertes Koordinatensystem . . . . .	10
2.4	Datenbeispiel zur Rotation . . . . .	11
2.5	Datenbeispiel zur Dekonvolution . . . . .	12
2.6	Ps-Laufzeiten versus Herdentfernung . . . . .	14
2.7	Datenbeispiel zur Laufzeitkorrektur . . . . .	15
2.8	Beispiel einer Inversion . . . . .	18
3.1	Geschwindigkeitsmodell IASP91 . . . . .	20
3.2	Übergänge des Olivin-Systems . . . . .	22
3.3	Gutenberg-Diskontinuität nach Karato . . . . .	24
3.4	Phasenübergänge in Olivin und Granat . . . . .	28
3.5	Mantelplumes: Schematische Darstellung . . . . .	30
4.1	Loa- und Kea-Trend . . . . .	34
4.2	Abfolge des Vulkanismus . . . . .	36
4.3	Isotopenverhältnisse . . . . .	38
4.4	Topographie und Geoid . . . . .	39
4.5	Stationskarte . . . . .	41
4.6	Seismizität . . . . .	42
4.7	Azimutale Verteilung . . . . .	43
5.1	Inversionsmodell für Station KIP (Oahu) . . . . .	47
5.2	Konversionen von der Moho . . . . .	48
5.3	Mohokonversionen, mit WWSSN-SP-Filter . . . . .	49
5.4	Station KIP: Profilschnitt in Realabstand . . . . .	51
5.5	Azimutale Variation der Mohotiefe unter KIP (Oahu) . . . . .	53
5.6	T-Komponenten unter KIP (Oahu) . . . . .	53

5.7	Inversion ohne LAB . . . . .	55
5.8	Durchstoßpunkte für 100 km . . . . .	57
5.9	Sektion in Profilsortierung bis 30 s . . . . .	58
5.10	Spuren im Bereich Big Island, ohne LVZ . . . . .	60
5.11	Spuren im Bereich Big Island, mit LVZ . . . . .	61
5.12	Durchstoßpunkte für $P_{140s}$ unter Big Island . . . . .	62
5.13	Manteldiskontinuitäten, profilsortierte Sektion . . . . .	64
5.14	Mantelübergangszone, profilsortierte Sektion . . . . .	65
5.15	Zeitvariation der $P_{410s}$ -Phase . . . . .	67
5.16	Zeitvariation der $P_{660s}$ -Phase . . . . .	68
5.17	Durchstoßpunkte für 410 km und 660 km . . . . .	69
5.18	Zeitdifferenzen der Mantelphasen . . . . .	72
5.19	Bootstrap-Untersuchung, Plumezone . . . . .	73
5.20	Bootstrap-Untersuchung, südöstlicher Bereich . . . . .	74
5.21	Bootstrap-Untersuchung, nordwestlicher Bereich . . . . .	74
5.22	Untersuchung verschiedener Plumeradien . . . . .	77
5.23	Untersuchung des Plumeradius in Ringsegmenten . . . . .	77
5.24	Tiefere Phasen, Plumezone . . . . .	79
5.25	Tiefere Phasen, südöstlicher Bereich . . . . .	80
5.26	Tiefere Phasen, nordwestlicher Bereich . . . . .	80
5.27	Modell krustaler Mischungszone nach <i>Wang et al.</i> . . . . .	82
5.28	Schematisiertes Strukturmodell unter Hawaii . . . . .	86

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Hawaii-Inseln werden oft als anschauliches Beispiel für die dynamischen Prozesse unseres Planeten herangezogen: Die nahezu perfekt in Reihe liegenden Inseln, welche sich teils oberhalb, teils unterhalb des Meeresspiegels über mehrere Tausend Kilometer erstrecken (*Abbildung 1.1*), sowie die exponierte Lage des rezenten Vulkanismus im zentralen Pazifik warfen frühzeitig wichtige Fragen auf, wie etwa nach der Ursache für die Linearität der Inselkette (Wilson, 1963) oder nach dem Ursprung des zu Grunde liegenden Vulkanismus. Die Beant-

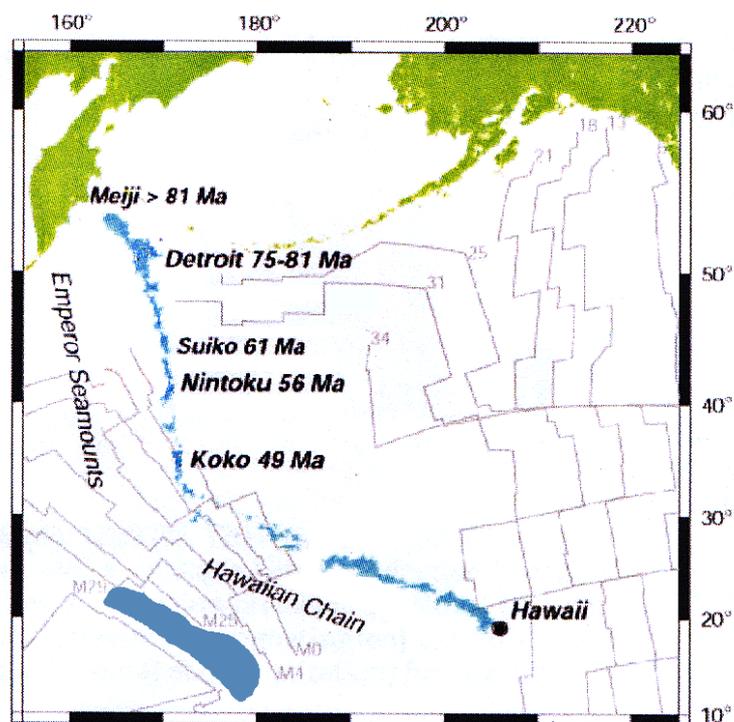


Abbildung 1.1: Verlauf der Hawaii-Emperor-Kette (aus: Tarduno et al. (2003)).

wortung dieser Fragen untermauerte nicht nur die Existenz der Kontinentaldrift, sondern begründete gleichsam auch die Theorie von Mantel-Plumes (Morgan, 1971).

Heute, vierzig Jahre später ist die Plattentektonik in den Geowissenschaften fest etabliert und die Theorie des tief in der Erde wurzelnden Hotspots weithin anerkannt. Über das Prinzip der Mantelkonvektion sind beide Phänomene miteinander verknüpft. Viele Fragen harren jedoch weiterhin einer Antwort. So etwa, ob die Konvektionsbewegung den gesamten Mantel umfasst oder in entkoppelten Schichten abläuft. Eine solche Entkopplung könnte durch die Diskontinuität in 660 km Tiefe verursacht werden. Der hier auftretende Phasenübergang behindert Strömungen in vertikaler Richtung (Cserepes und Yuen, 2000).

Vertikale Aufströme sind z.B. durch Mantel-Plumes realisiert. Von diesen nimmt man an, dass sie an der Kern-Mantel-Grenze entstehen und im Gegensatz zur driftenden Platte ortsfest sind. Beide Annahmen sind jedoch nicht endgültig bewiesen und mit Messdaten belegt. Insbesondere die Entstehungstiefe von Plumes wird kontrovers diskutiert (z.B. Ritsema und Allen (2003); Cserepes *et al.* (2000a)), Zweifel bestehen jedoch auch an der Ortsfestigkeit (Norton, 1995; Stoll und Leven, 2003). Eine genauere Untersuchung von Mantel-Plumes ist daher für das allgemeine Verständnis der dynamischen Abläufe im Erdmantel unabdingbar.

Der Hawaii-Plume ist nicht nur einer der bekanntesten und größten Hotspots, er zeichnet sich überdies durch seine isolierte Lage aus, die es möglich macht, die Auswirkungen des aufsteigenden heißen Materials auf das umgebende Mantelgestein und insbesondere der temperaturabhängigen Diskontinuitäten ungestört von weiteren tektonischen Einflüssen zu erforschen. Diese Arbeit will einen Beitrag dazu leisten, Hinweise auf den Ursprung des Plumes zu finden und die Position des aufsteigenden Plumes sowie der Effekte, die hierdurch erzeugt werden, im oberen Mantel zu lokalisieren. Zu diesem Zweck sollen die Diskontinuitäten der Lithosphäre und des oberen Mantels auf Tiefenvariationen hin untersucht werden.

In *Kapitel 2* wird zunächst die Methode der *Receiver Functions* erklärt. Nach der Beschreibung des Konzepts und des theoretischen Hintergrundes werden die Grundschriffe anhand eines Beispiels erläutert sowie weiterführende Untersuchungsmethoden, wie sie aus der aktiven Seismik bekannt sind, aufgezeigt.

*Kapitel 3* fasst den aktuellen Kenntnisstand über den allgemeinen Aufbau und der Komposition des Erdmantels und der Kruste zusammen. Hier wird die Abfolge der bekannten Grenzschriffe und der ihnen vermutlich zu Grunde liegenden Mechanismen beschrieben. Dabei werden die Faktoren beleuchtet, welche die Tiefe der Diskontinuitäten steuern, und die Auswirkungen besprochen, die ein Mantel-Plume jeweils ausüben würde. Von besonderem

Interesse ist dabei die Mantelübergangszone, die den oberen vom unteren Mantel trennt und von entscheidender Bedeutung für die Mantelkonvektion ist.

Das Messgebiet wird in *Kapitel 4* vorgestellt. Hier sind zunächst die bereits bekannten Fakten und Vermutungen über den Hawaii-Hotspot und den Ablauf des Vulkanismus in seinen verschiedenen Phasen zusammengetragen. Im Weiteren werden die Inselkette wie auch die sie umgebende *Hawaiischwelle* beschrieben und bestehende Modellvorstellungen ihrer Entstehung erläutert. Es folgt eine Beschreibung des Messprojektes und der für die Auswertung verfügbaren Daten.

Im *Kapitel 5* erfolgt die Auswertung des Datenmaterials. Die bekannten Diskontinuitäten werden in den Daten identifiziert und auf laterale Tiefenänderungen hin untersucht. Ebenso werden zusätzliche konvertierte Phasen, die in Teilen des Messgebietes auftreten, vorgestellt und in Datenbeispielen belegt. Es werden Vorschläge zur Erklärung dieser Konversionen gemacht und diskutiert.

Die einzelnen Beobachtungen werden schließlich zusammengeführt. Aus ihrer Gesamtheit werden die Lage und Position des Plumeschlauches im Mantel abgeleitet und im Kontext früherer Ergebnisse diskutiert.

*Kapitel 6* stellt abschließend noch einmal die Ziele und Ergebnisse des Hawaii-Plume-Projektes nebeneinander. Die Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Daten werden zusammengefasst und ihre Bedeutung für den Hawaii-Hotspot dargelegt.

