

Zeit-Frequenzanalyse nichtstationärer vulkanischer Tremorsignale

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Thorsten Bartosch

Erlangen, 2000

Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik

Band 15

Thorsten Bartosch

**Zeit-Frequenzanalyse nichtstationärer
vulkanischer Tremorsignale**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Bartosch, Thorsten:

Zeit-Frequenzanalyse nichtstationärer vulkanischer Tremorsignale/

Thorsten Bartosch. Aachen : Shaker, 2000

(Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik; Bd. 15)

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-7467-2

Copyright Shaker Verlag 2000

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7467-2

ISSN 1432-489X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 6. September 1999

Tag der Promotion: 27. März 2000

Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Berichterstatter: apl.Prof.Dr.-Ing. Dr.-Ing.habil P. Steffen
apl.Prof. Dr. R. Schick

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Steffen für die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit, für die vielen wertvollen Diskussionen und Anregungen und die besondere Hilfe bei der Niederschrift dieser Arbeit.

Herrn Dr. rer. nat. D. Seidl möchte ich danken für seine Diskussionsbereitschaft und seinen Rat in vulkanologischen Fragen, für sein Interesse an meiner Arbeit, seine Hilfe, die mir Kontakt zu Vulkanologen ermöglichte, sowie für die Bereitstellung umfangreichen Datenmaterials.

Herrn Prof. Dr. R. Schick danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens und für seine großzügige Unterstützung, die mir unter Anderem die Teilnahme an seismischen Messungen in Indonesien ermöglichte.

Herrn Dr. J. Neuberg danke ich für seine große Gastfreundschaft und die anregenden Gespräche, für die Bereitstellung wichtigen Datenmaterials und dafür, daß er mir lehrreiche Einblicke in seine wissenschaftliche Arbeit ermöglicht hat.

Bei Herrn Dr. W. Zürn bedanke ich mich für erhellende Diskussionen und die mir zur Verfügung gestellten Meßdaten. Meinen Kollegen am Lehrstuhl, vor allem Herrn Dipl.-Ing. F. Heinle und Herrn Dipl.-Ing. G. Runze, gilt mein Dank für klärende Diskussionen. Herrn Dr. Dipl.-Ing. U. Horn und Herrn Dipl.-Ing. B. Westrich danke ich herzlich für die rasche Beseitigung der vielen kleinen und großen Probleme, die die Beziehung zwischen mir und meiner Workstation gelegentlich trübten.

Inhaltsverzeichnis

Übersicht	1
1 Einleitung	3
1.1 Eigenschaften vulkanischer Tremorsignale	3
1.2 Physikalische Modelle	5
1.3 Überblick der Analysemethoden	7
2 Zeit-Frequenzanalyse mit der Wavelet-Transformation	10
2.1 Kurz-Zeit-Fourier-Transformation	13
2.2 Wavelet-Transformation	16
2.2.1 Kontinuierliche Wavelet-Transformation	16
2.2.2 Diskretisierung der Wavelet-Transformation	19
2.2.3 Wavelet-Frames	20
2.2.4 Orthogonale Wavelets	25
2.2.4.1 Multiresolutionsanalyse	25
2.2.4.2 Startraumapproximation	31
2.2.4.3 Algorithmus von Mallat	32
2.2.5 Nichtorthogonale Wavelets	36
2.2.5.1 Berechnung der kontinuierlichen Wavelet-Transformation	38
2.2.5.2 Abdeckung	41
2.2.5.3 Rücktransformation der kontinuierlichen Wavelet-Transformation	44
2.2.5.4 Beispielsignal	45
2.2.5.5 Berechnung der kontinuierlichen Wavelet-Transformation mit Stimmen	51
2.2.5.6 Rücktransformation der kontinuierlichen Wavelet-Transformation mit Stimmen	53
2.2.6 Wavelet-Kohärenz	54
2.2.6.1 Beispiel anhand von synthetischen Signalen	56
2.3 Vergleich der DKZFT, SKWT und DWT anhand eines synthetischen Signals	59
3 Vulkanmonitoring mit Adaptiver Wellenform Analyse	62
3.1 Wavelet-Packet-Transformation	63
3.1.1 Quadraturspiegel-Filter	64
3.1.2 Zusammenhang zwischen QSF und einer MRA	66

3.1.2.1	Notwendige Bedingungen einer MRA	66
3.1.2.2	Hinreichende Bedingungen einer MRA	68
3.1.3	Wavelet-Packets auf konstanter Skala	68
3.1.4	Multiskalen-Wavelet-Packets	71
3.1.4.1	Paley und sequentielle Ordnung der Wavelet-Packet-Räume	72
3.1.4.2	Frequenzlokalisierung der Wavelet-Packet-Räume	73
3.1.4.3	Diskrete Wavelet-Packet-Transformation	74
3.1.4.4	Alternative Zählung des Stufenindex	76
3.1.4.5	Periodische Wavelet-Packet-Transformation	77
3.1.5	„Best-basis“ Selektionsalgorithmus	78
3.1.6	Interpretation des Wavelet-Packet-Tables in der ZF-Ebene	79
3.1.7	Nachteile der WPT zur Signalanalyse	81
3.2	Unterdrückung von Aliasing in der ZF-Ebene	82
3.2.1	Nichtstationäre Wavelet-Packet-Transformation	82
3.2.2	Filterentwurf nach Hess-Nielsen	83
3.3	Zeitinvariante Wavelet-Packet-Transformation	86
3.3.1	Berechnung des zeitinvarianten Wavelet-Packet-Tables	89
3.3.2	Beste orthonormale zeitinvariante Basis	91
3.3.3	Suboptimale orthonormale zeitinvariante Basis	92
3.4	Nichtstationäre zeitinvariante Wavelet-Packet-Transformation	94
3.5	Beispiel anhand von synthetischen Signalen	97
4	ARMA-Spektralschätzung mit dem iterativen Prony-Verfahren	100
4.1	Erweitertes Prony-Verfahren	102
4.2	Iteratives Prony-Verfahren	104
4.2.1	Verbesserung der ersten Schätzung	106
4.2.2	Systemgrad und Abbruchkriterien	107
4.3	Synthetisches Beispielsignal	108
4.4	Spektrogrammanalyse	113
5	Spektrogrammanalyse von vulkanischen Tremorsignalen	117
5.1	Vulkan Galeras	118
5.1.1	Typenklassifizierung von Tornillos	119
5.1.2	Änderung der Momentanfrequenz mit der Zeit	120
5.1.3	Einschwingverhalten	121
5.1.4	Zusammenfassung	121
5.2	Vulkan Semeru (1992)	129
5.2.1	Harmonisches Obertonspektrum	129
5.2.2	Einschwingverhalten der Moden	131
5.2.3	Zusammenfassung	132
5.3	Vulkan Semeru (1995)	138
5.3.1	Harmonischer Tremor	138
5.3.2	Untersuchung der Tremorsignale	138
5.3.3	Untersuchung von Schockereignissen	139
5.3.3.1	Analyse global beobachtbarer Schocks	139

5.3.4	Zusammenfassung	140
5.4	Vulkan Stromboli	143
5.4.1	Spektrogrammanalyse	144
5.4.2	Kohärenzuntersuchungen	146
5.4.3	Zusammenfassung	148
5.5	Vulkan Pinatubo	158
5.6	Vulkan Laskar	162
5.6.1	Untersuchung der spektralen Ähnlichkeit von Schocks	165
5.6.2	Spektrogrammanalyse von Schockereignissen	166
5.6.3	Zusammenfassung	167
	Zusammenfassung	170
	Anhang	178
	A Hess-Nielsen Filterkoeffizienten	178
	B Partielle Ableitungen von Vektorfunktionen	183
B.1	Gradient und Hesse-Matrix einer skalaren Funktion mit reellen Argumentvektoren	184
B.2	Gradient und Hesse-Matrix einer skalaren Funktion mit komplexen Argumentvektoren	184
	Literaturverzeichnis	190
	Abkürzungen und Formelzeichen	199