

Oberflächenwellen und Materialprüfung aus seismologischer Sicht

Peter G. Malischewsky,
Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität, Jena,
e-mail: p.mali@uni-jena.de ;

Jürgen-Dieter Schnapp, Institut für Materialwissenschaft
und Werkstofftechnologie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena,
e-mail: juergen.dieter.schnapp@uni-jena.de

Kontakt: [Prof. Dr. rer.nat. habil. Peter G. Malischewsky](#) *Ferne Kunde bringt dir der zitternde
Fels - deute die Zeichen!*
Emil Wiechert

<http://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/p32/p32.htm>

Zusammenfassung

Auf der Oberfläche elastischer Materialien können akustische Wellen unterschiedlicher Polarisation angeregt werden: elliptisch polarisierte Rayleighwellen und transversal polarisierte Lovewellen. Diese Wellen werden routinemäßig in der Seismologie und Geophysik zur Tiefenerkundung der Erde genutzt. Obwohl die Oberflächenwellen häufig signifikante Wellengruppen ausbilden, werden sie verhältnismäßig selten für die zerstörungsfreie Materialprüfung eingesetzt. Jedoch lassen die physikalischen Eigenschaften der akustischen Oberflächenwellen in bestimmten Fällen diese prädestiniert für die Prüfung oberflächennaher Regionen von Werkstoffen im weitesten Sinne erscheinen. Es werden einige Beispielmessungen präsentiert, die eine signifikante Empfindlichkeit der Oberflächenwellen auf oberflächliche Veränderungen zeigen. Weiterhin wird angeregt, die Verfahren der Datenbearbeitung aus der Geophysik und Seismologie in der ZfP mit akustischen Oberflächenwellen einzusetzen und letztlich ein praktikables Prüfverfahren und Gerätesystem zu entwickeln. Schließlich wird erstmals vorgeschlagen, die z. B. bei Baugrunduntersuchungen häufig und erfolgreich eingesetzte *H/V*-Methode der Rayleighwellen auch für die zerstörungsfreie Materialprüfung zu verwenden. Dafür ist die gleichzeitige Messung von horizontaler und vertikaler Bewegung mit einem geeigneten Prüfkopf erforderlich.

Summary

Acoustic waves with different polarization can be excited on surfaces of elastic materials: elliptically polarized Rayleigh waves and transversally polarized Love waves. These waves are routinely used in seismology and geophysics for the investigation of the Earth's interior. Though surface waves very often form significant wave groups, they are comparatively seldom used for non-destructive testing. However, the physical properties of acoustic surface waves directly suggest to use them for testing the superficial regions of materials in the widest sense. Some first measurements are presented, which demonstrate a significant sensitivity for superficial changes. Further it is suggested to use the methods of data analysis in geophysics and seismology for non-destructive testing with acoustic surface waves and to develop a practical method of testing and a suitable equipment. Finally it is proposed for the first time to apply the so-called *H/V*-method of Rayleigh waves, which is frequently and successfully used for foundation-soil investigations, also

for non-destructive testing. For this purpose it is necessary to measure the horizontal and vertical motions simultaneously with suitable transducers.

1. Einleitung

Auf der Oberfläche elastischer Medien können sich akustische Oberflächenwellen ausbreiten, die sich in ihren physikalischen Eigenschaften deutlich von den sogenannten Raum oder Körperwellen unterscheiden. Während der Einsatz letzterer für die zerstörungsfreie Materialprüfung bereits Standard ist, erfolgt die Anwendung von akustischen Oberflächenwellen für Prüfzwecke in weit geringerem Maße und oft nur sporadisch. In vielen Fällen werden die Oberflächenwellen nur als Störsignal angesehen. Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften erscheinen sie aber für bestimmte Prüfzwecke geradezu prädestiniert. Die *Eindringtiefe* der Rayleighwellen (Abnahme auf 1/10) in Abhängigkeit vom Poissonverhältnis ν und normiert auf die Wellenlänge λ_R variiert gemäß Abb. 1 von 1 bis 1.75:

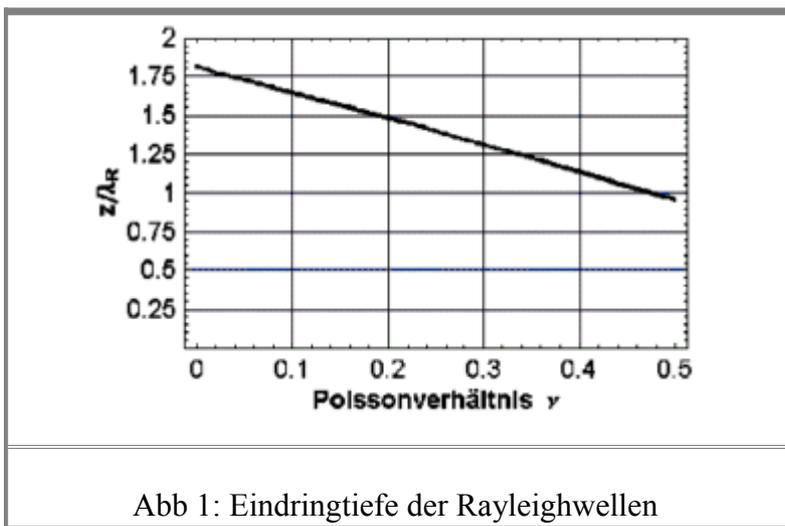


Abb 1: Eindringtiefe der Rayleighwellen

In einem homogenen Material ist die Phasengeschwindigkeit c der Rayleighwellen unabhängig von der Frequenz jedoch eine Funktion vom Poissonverhältnis (siehe Abb. 2), wobei die Formel, die durch Reihenentwicklung aus Malischewsky's (2000) exakter Formel folgt,

$$c = v_s (0.874 + 0.195 \nu - 0.04 \nu^2 - 0.069 \nu^3)$$

eine sehr gute Näherung darstellt, sogar für negative ν , wie sie in besonderen Substanzen vorkommen. Hierbei ist v_s die Geschwindigkeit der Transversalwellen. Eine etwas andere Formel wurde auch schon von Scruby et al. (1987) angegeben.

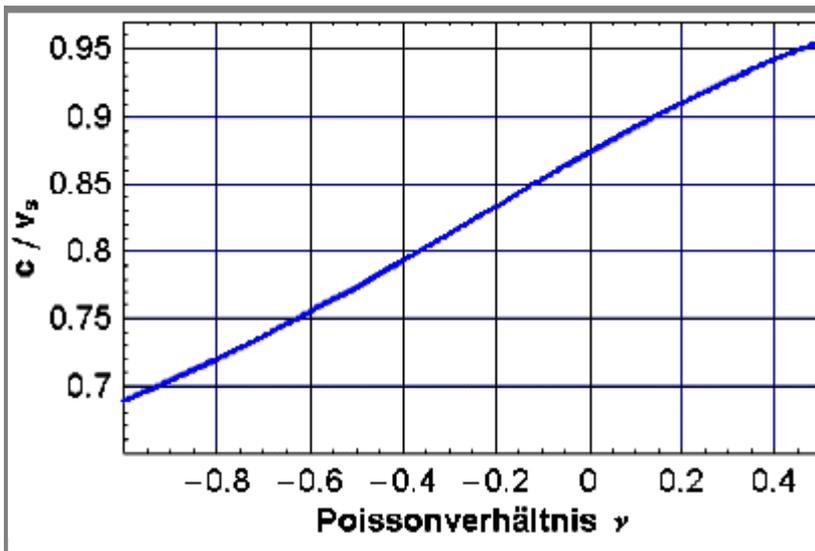


Abb 2: Geschwindigkeit der Rayleighwellen in Abhängigkeit vom Poissonverhältnis

Im weiteren soll nun die Existenz der verschiedenen Oberflächenwellen in einem Werkstoff mit oberflächlich veränderter Schicht anhand eines einfachen Analogiemodells, der sogenannten Impedanzoberfläche, erläutert werden. In Abb. 3 wird ein elastischer Halbraum mit den Laméschen Parametern μ , λ und der Dichte ρ gezeigt, der mit einer dünnen Schicht der Dicke d' und den Parametern μ' , λ' und ρ' bedeckt ist:

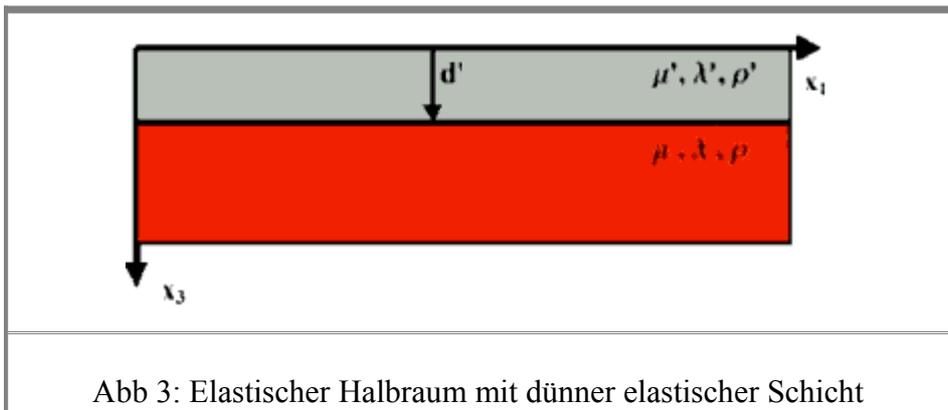


Abb 3: Elastischer Halbraum mit dünner elastischer Schicht

Dieser Sachverhalt kann durch Anwendung der Randbedingungen nach Tiersten (1969) in einem homogenen Halbraum simuliert werden, wobei nicht wie üblich die Spannungsfreiheit der Oberfläche gefordert wird, sondern eine kompliziertere durch die Last der Schicht mit der Dicke d' hervorgerufene impedanzartige Randbedingung:

$$\sigma_{i3} + \varepsilon_i u_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad \text{für } x_3 = 0,$$

wobei σ_{i3} die relevanten Komponenten des Spannungstensors, u_i die Verrückungskomponenten und ε_i geeignete Konstanten sind, die von den Materialparametern der Schicht und des Substrats abhängen [vgl. Malischewsky et al. (2002)]. Genau diese Situation ist es, die in der Werkstoffprüfung interessieren kann: **oberflächliche Veränderungen am Werkstoff**. Eine solche Impedanzoberfläche unterstützt Rayleigh und Lovewellen, wobei wir auf letztere hier nicht eingehen.

Die vektoriellen elliptisch polarisierten *Rayleighwellen* haben eine *horizontale Komponente* u_1 und eine *vertikale Komponente* u_3 und breiten sich mit der *Phasengeschwindigkeit* c aus. Die für

die Werkstoffprüfung interessante Eigenschaft dieser Oberflächenwellen ist ihre *Dispersion*, d. h. die Abhängigkeit der Phasen bzw. Gruppengeschwindigkeit von der Frequenz $c = c(f)$, sowie ihre *frequenzabhängige Elliptizität*, d. h. das Verhältnis H/V- von horizontaler zu vertikaler Komponente. Das Extrahieren der Dispersion erfolgt durch eine Analyse in der Frequenz-Zeit-Ebene, die auf Gabor (1946) zurückgeht. Dabei werden die sogenannten Gabor'schen Elementarsignale ausgewertet, und zwar gibt es zwei verschiedene Verfahrensweisen:

- Zerlegung des Zeitsignals in Abschnitte (Moving-Window-Analyse)
- Zerlegung des Spektrums in Abschnitte (multiple Filtertechnik)

Aus der so gebildeten *Gabormatrix* erhält man aus dem Signal die Gruppengeschwindigkeitsdispersion (siehe Abb. 6). Dabei braucht man mit dem Prüfkopf nur an einem Punkt zu messen und erhält summarisch die oberflächlichen Eigenschaften zwischen Quelle und Prüfkopf. Zur Bestimmung der Phasengeschwindigkeit sind dagegen mindestens zwei Positionen des Prüfkopfs erforderlich.

2. Charakterisierung oberflächennaher Materialveränderungen durch Dispersion von Rayleighwellen

Oberflächenwellen charakterisieren, wie der Name schon sagt, oberflächennahe Regionen des Materials. Ganz grob gesprochen kann man von einer Eindringtiefe in der Größenordnung einer Wellenlänge ausgehen. Es kommt nun darauf an, durch geeignete Geber auf der Oberfläche des zu prüfenden Materials kurze akustische Impulse mit genügend großem Frequenzinhalt zu erzeugen, die bei ihrer Ausbreitung auf der Oberfläche zur Ausbildung längerer dispergierter Rayleighwellenzüge führen. Diese werden entlang von Profilen mit Aufnehmern abgegriffen (Abb. 4) und einer digitalen Analyse zugeführt.

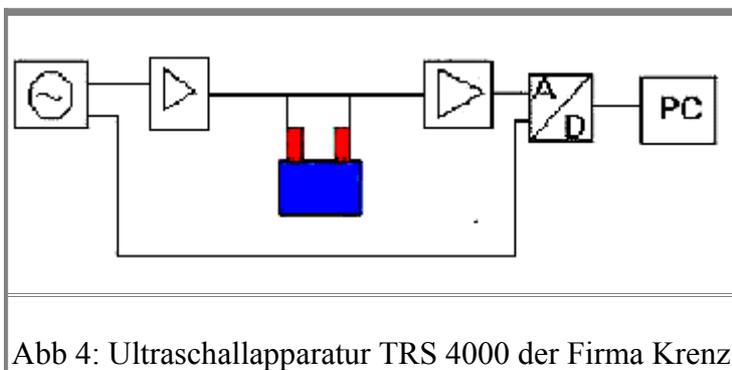


Abb 4: Ultraschallapparatur TRS 4000 der Firma Krenz

Im Gegensatz zur Ultraschalltomographie werden hierbei nicht nur die Ersteinsätze sondern der gesamte Wellenzug ausgewertet. In der Seismologie ist die Ausnutzung der **Dispersion von Oberflächenwellen** zur Strukturanalyse ein Standardverfahren, das sich in letzter Zeit auch in der Materialforschung unter der Bezeichnung **SASW (Spectral Analysis of Surface Waves)** etabliert hat. Es wird vorgeschlagen, die immensen theoretischen und praktischen Erfahrungen der Seismologie bei der Interpretation von Oberflächenwellen in der Denkmalspflege, Bauwerkskonservierung und Materialprüfung einzusetzen. Die oberste zu untersuchende Schicht unterscheidet sich z. B. durch Verwitterung bzw. Aushärtung in den Materialparametern vom darunterliegenden Substrat: insbesondere bezüglich der unterschiedlichen effektiven Scherwellengeschwindigkeit, aber auch der unterschiedlichen Poissonverhältnisse und Dichten oder auch nur durch unterschiedliches Anisotropieverhalten. Während sich Rayleighwellen im homogenen und isotropen Halbraum bekanntlich dispersionsfrei ausbreiten, führen diese Unterschiede zu einer merklichen Dispersion, die zur Beurteilung des Zustandes der obersten Schicht genutzt werden kann. Diesbezüglich sind von Meier et al. (1998) vielversprechende

Versuche auch an konkreten denkmalpflegerischen Objekten durchgeführt worden.

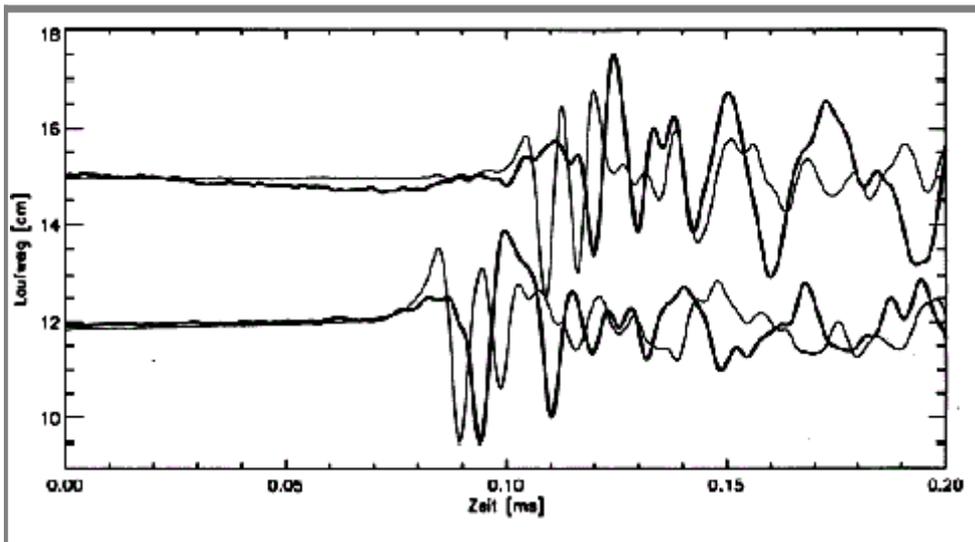


Abb 5: Vergleich der Oberflächenwellen auf der unverwitterten Seite (dünn) und der verwitterten Seite (dick) eines Sandsteins auf zwei Wellenwegen unterschiedlicher Länge. Auf der verwitterten Seite sind die Geschwindigkeiten bei hohen Frequenzen geringer (Meier et al., 1998)

Während man in der Abb. 5 schon durch visuelle Inspektion deutliche Unterschiede der Wellenzüge bei Ausbreitung in verwittertem bzw. unverwittertem Material erkennt, hat man für eine genauere Interpretation eine spektrale Analyse mittels Wellenzahlfilterung (sogenannte F-k Analyse) durchzuführen, die zur Phasengeschwindigkeit führt bzw. über die Gabor-Matrix zur Gruppengeschwindigkeit.

In der Abb. 6 sind Beispiele für Analysen mit der Gabor-Matrix angeführt und zwar für reinen Beton (grau) und für Beton mit aufgebracht 0.7 mm starken Paraffinschicht (rot).

Die zu erwartenden theoretischen Phasen (dick) und Gruppengeschwindigkeiten (gestrichelt) in Abhängigkeit von der Periode T sind der Abb. 7 zu entnehmen. Die dünne Linie markiert die Phasengeschwindigkeit der Rayleighwellen im reinen Beton, wobei mit folgenden Parametern gerechnet wurde:

$$\text{Beton: } v_p = 4.58 \text{ km/s, } v_s = 2.82 \text{ km/s, } \rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Paraffin: } v_p = 1.86 \text{ km/s, } v_s = 1.14 \text{ km/s (geschätzt), } \rho = 1.15 \text{ g/cm}^3 .$$

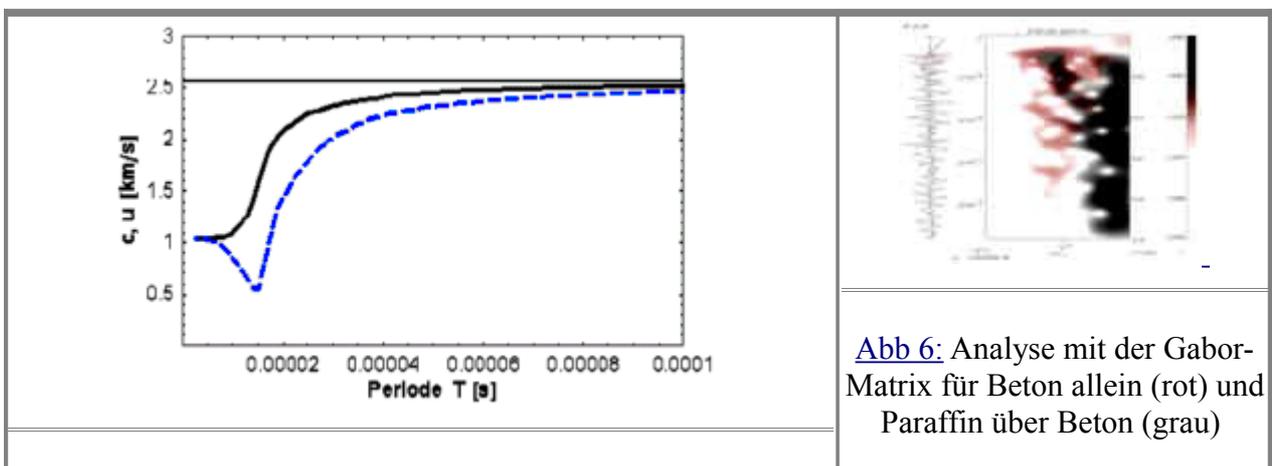


Abb 6: Analyse mit der Gabor-Matrix für Beton allein (rot) und Paraffin über Beton (grau)

Abb 7: Phasen- (dick) und Gruppengeschwindigkeiten (gestrichelt) für Rayleighwellen von Paraffin über Beton und reinem Beton (dünn) in Abhängigkeit von der Periode T	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

In Abb. 6 sind deutlich die unterschiedlichen Wellenformen zu erkennen: durch das Aufbringen von Paraffin wird ein langer dispergierter Wellenzug erzeugt. Die Gabor-Matrix, die in den "Gebirgskämmen" die Gruppengeschwindigkeit widerspiegelt, ist in den beiden Fällen deutlich unterschieden. Im Bildteil rechts deutet sich das Gruppengeschwindigkeitsminimum von Abb. 7 an. Auf diese Weise können letztlich die aktuellen Materialeigenschaften der obersten Schicht und ihre Tiefenreichweite invertiert werden.

3. Die H/V - Methode

Die Elliptizität der Rayleighwellen, die markant durch die Eigenschaften der obersten Schichten beeinflusst wird, legt es nahe, diesen Parameter als zusätzliche Informationsquelle neben der Phasen und Gruppengeschwindigkeitsdispersion bei der Inversion nach den Materialeigenschaften zu nutzen. Diese H/V -Technik ist ein jüngerer Werkzeug bei der Erkundung des geologischen Untergrundes mit Hilfe seismischer Messungen. Durch Messung der natürlichen Bodenunruhe kann auf die Tiefe der Deckschicht mit geringerer Scherwellengeschwindigkeit geschlossen werden. Die Methode liefert an Stelle der dominanten Standortfrequenz einen Peakwert in Übereinstimmung mit der Oberflächenwellentheorie. Mit großem Erfolg wurde dieses Verfahren z. B. von Fäh et al. (2001) genutzt, um alluviale weiche Deckschichten in Schweizer Talsedimenten zu erkunden. Da Prüfköpfe existieren, die die gleichzeitige Registrierung von horizontalen und vertikalen Bewegungen zulassen, sollte dieses Verfahren auch in der Werkstoffprüfung erfolgreich sein. Eine sehr einfache *Näherungsformel nach Love (1911)*, die das Verhältnis H/V - mit der Rayleighgeschwindigkeit c und der Scherwellengeschwindigkeit v_{S1} der Schicht verbindet,

$$H/V \approx 1 - 0.5 \frac{c^2}{v_{S1}^2}$$

sollte eine einfache Inversion ermöglichen. Allerdings wiesen Malischewsky und Scherbaum (2004) in einer neuen Arbeit darauf hin, daß der Gültigkeitsbereich von dieser Gleichung eingeschränkt ist und man ohne Zusatzinformationen die strenge, wesentlich kompliziertere Formel zu benutzen hat.

Literatur

1. Fäh, D.; Kind, F.; Giardini, D.: A theoretical investigation of average H/V ratios, Geophys. J. Int. 145 (2001), 535-549.
2. Gabor, D.: Theory of communication, J. IEE (London), 93 (1946), 429-457.
3. Love, A. E. H.: Some problems of geodynamics, Dover Publ., New York 1911.
4. Malischewsky, P. G.: Comment to "A new formula for the velocity of Rayleigh waves" by D. Nkemzi, Wave Motion 31 (2000), 93-96.
5. Malischewsky, P. G.; Wuttke, F.; Ziegert, A.: Nutzung akustischer Oberflächenwellen zur zerstörungsfreien Materialprüfung, Thüringer Werkstofftag 2002 (Hg.: J. D. Schnapp, U. Glatzel, K. D. Jandt, H. Knake), Schriftenreihe Werkstoffwissenschaften Bd. 17, 135-140, Verlag Dr. Köster, Berlin 2002.
6. Malischewsky, P. G.; Scherbaum, F.: Love's formula and H/V ratio (ellipticity) of Rayleigh waves, Wave Motion 40 (2004), 57-67.
7. Meier, Th.; Malischewsky, P.; Ziegert, A.: Ultraschalluntersuchungen zur Inversion

- elastischer Wellen, 58. Jahrestagung der DGG in Göttingen 1998, PBP 08, S. 53.
8. Scruby, C. B.; Jones, K. R.; Antoniazzi, L.: Diffraction of elastic waves by defects in plates, J. of Nondestructive Evaluation 5 (1987), 145-156.
 9. Tiersten, H. F.: Elastic surface waves guided by thin films, J. Appl. Phys. 40 (1969), 770-789.

[START](#)

Herausgeber: [DGfZP](#)

Programmierung: [NDT.net](#)