

**Charakterisierung oberflächennaher
Materialparameter mit laserangeregten akustischen
Oberflächenwellen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
M.Eng. Ferdinand Singer
aus
Naila

Erstgutachter: *Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer*
Zweitgutachter: *Prof. Dr. Gerhard Lindner*
Tag der mündlichen Prüfung: *06.04.2017*

Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik
Universität Bayreuth
2017

Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 22

Ferdinand Singer

**Charakterisierung oberflächennaher Material-
parameter mit laserangeregten akustischen
Oberflächenwellen**

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5497-2

ISSN 1862-9466

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort der Herausgeber

Die Verbesserung vieler verfahrenstechnischer oder fertigungstechnischer Prozesse setzt voraus, dass man Werkstücke und Materialsysteme zerstörungsfrei im laufenden Prozess prüfen kann (im Englischen spricht man von *Non-Destructive Evaluation*, NDE). Hierfür eignen sich zum Beispiel bildgebende Verfahren auf der Basis elektromagnetischer Wellen (Infrarot, sichtbares Licht, Röntgenstrahlung) oder von Ultraschallwellen. In jedem Anwendungsfall ist wieder neu zu klären, ob und wie die zu prüfende Eigenschaft mit den messbaren Welleneigenschaften korreliert.

Die hier vorliegende Arbeit hatte zum Ziel zu untersuchen, wie gut sich ein Messsystem auf der Basis berührungslos angeregter und detektierter akustischer Oberflächenwellen zur Messung oberflächennaher Materialeigenschaften eignet. Hierzu wurde zunächst ein Aufbau realisiert, bei dem Schallwellen im Frequenzbereich von einigen MHz bis zu einigen 10 MHz thermoelastisch mit einem gepulsten Laser angeregt und nach einer kurzen Wegstrecke in dem zu prüfenden Materialsystem interferometrisch wieder erfasst werden. Der Aufbau und die dafür nötige Signalverarbeitung werden ebenso detailliert analysiert wie die Effekte bei der Schallausbreitung und die Beiträge zur Messunsicherheit.

Danach wird die Anwendbarkeit des NDE-Messsystems auf verschiedene praktisch interessante Fälle demonstriert. So ließen sich bei einsatzgehärteten Stählen Härtegradienten rekonstruieren, die für Tiefen ab $50\ \mu\text{m}$ ausgezeichnet mit zerstörenden Vickers-Messungen übereinstimmen. Bei eloxierten Aluminiumschichten ließen sich effektive E-Moduln bestimmen, die plausible Abhängigkeiten von Prozessparametern wie Temperatur und Eloxierzeit aufweisen. Auch die berührungslos gemessene Dicke von Polymerbeschichtungen stimmte ausgezeichnet mit konventionell per Messtaster gemessenen Werten überein, und bei verschiedenen Walzblechen ließen sich Texturkoeffizienten ableiten, die sehr gut zu grundlegenden Modellvorstellungen passen. Da die Beschreibung auch auf die jeweiligen Grenzen der Anwendbarkeit eingeht, lassen sich leicht Ansätze für analoge Anwendungen oder für weiteren Forschungsbedarf identifizieren.

Bayreuth im August 2017

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos und als Gastherausgeber Prof. Dr. Gerhard Lindner

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
Formelzeichen	XII
Kurzfassung	XVII
1. Einleitung	1
1.1. Stand der Technik und Wissenschaft	3
1.1.1. Härteprüfung	3
1.1.2. Mikromagnetische Methoden	5
1.1.3. Thermische Verfahren	8
1.1.4. Ultraschall-Verfahren	9
1.2. Motivation und Ziel	12
1.3. Aufbau der Arbeit	13
2. Laser-Ultraschall-Methode	16
2.1. Ultraschallausbreitung	16
2.1.1. Volumenwellen	16
2.1.2. Rayleighwellen	18
2.1.3. Rayleighwellen in Schichtsystemen	22
2.1.4. Streuung an Korngrenzen	37
2.1.5. Anisotropie in texturierten polykristallinen Metallen	45

2.1.6. Beugung	57
2.2. Laserangeregte Rayleighwellen	64
2.2.1. Theoretische Beschreibung gepulster Anregung	69
2.3. Laser-Doppler-Vibrometrie	76
3. Optisches Oberflächenwellen-Spektrometer	83
3.1. Methodik	83
3.1.1. Aufbau des Messsystems	83
3.1.2. Messdatenerfassung und -analyse	87
3.1.3. Messfehler	90
3.2. Anwendungen	97
3.2.1. Bestimmung der Härtegradienten von gasaufgekohlten Stählen	97
3.2.2. Messung der elastischen Eigenschaften eloxierter Alumi- umschichten	117
3.2.3. Charakterisierung von Polymerbeschichtungen	130
3.2.4. Vermessung anisotroper Materialparameter	138
4. Fazit	147
4.1. Zusammenfassung	147
4.2. Erkenntnisgewinn	150
4.3. Ausblick	153
4.4. Summary	156
4.4.1. Outlook	160
A. Anhang	163
A.1. Transfer-Matrix	163
A.2. Laserangeregte Rayleigh Wellen	164
A.3. Berechnung der Dispersionskurven	165
Literaturverzeichnis	167