Baden-Württemberg Stiftung

WIR STIFTEN ZUKUNFT

Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Multiskalige Inspektion mittels Deflektometrie und Wavelet-basierten Verfahren

Multiskalige Inspektion mittels Deflektometrie und Wavelet-basierten Verfahren

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Optische Technologien“ der Baden-Württemberg-Stiftung gGmbH forschte das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gemeinsam mit der Hochschule Pforzheim an multiskaligen Verfahren für die Detektion, Klassifikation, Bewertung und Rekonstruktion von Oberflächenfehlern auf spiegelnden Oberflächen.

Die Geometrie der spiegelnden bzw. teilspiegelnden Oberflächen wurde mithilfe der Deflektometrie als flächigem, optischem Messverfahren erfasst (siehe z.B. [1]). Für die Auswertung solcher Messdaten existierten bisher nur wenige geeignete Ansätze. Zur Verbesserung der Datenauswertung wurde die Anwendung Wavelet-basierter Verfahren untersucht und verschiedene Methoden vorgestellt.

Die Wavelet-Transformation bietet gegenüber der Fourier-Transformation den Vorteil, dass die Signalanalyse dabei sowohl im Frequenzbereich als auch im Ortsbereich stattfindet. Diese wichtige Eigenschaft ermöglicht eine gute Lokalisierung eines gesuchten Signalanteils, z.B. eines Defekts, im Bild. Die Wavelet-Transformation wird mit Hilfe einer Multiratenfilterbank implementiert. Durch die Abfolge der Filterstufen lassen sich unterschiedliche Auflösungsstufen (Skalen) untersuchen. Mit höherer Skala werden niederfrequentere und damit ausgedehntere Fehler auf der Oberfläche erkannt, während tiefere Skalen auf kleinere Fehler ansprechen. Als Ergebnis stehen die skalen- und ortsabhängigen Wavelet-Koeffizienten zur Verfügung. Abbildung 1 illustriert die Analyse mit Hilfe eines Wavelets. Bei jeder Skala wird eine Analyse durchgeführt, bei der die Daten in Tiefpass- und Bandpassanteil zerlegt werden. Der Bandpassanteil enthält die Information in vertikaler, horizontaler und diagonaler Richtung.

1. Entwurf der Wavelet-Filterbank

Die erste Möglichkeit für die Auswertung von deflektometrischen Messdaten mithilfe von Wavelets ist die Anwendung von bekannten „klassischen“ Wavelet-Familien. Hierzu wurden unterschiedliche Wavelet-Familien betrachtet und untersucht. Unter diesen Wavelet-Familien haben sich die Bi-orthogonalen Spline Wavelets als am besten geeignet für die Klassifikationsaufgabe herausgestellt. Außerdem wurden neue Entwurfsverfahren für die Wavelet-Filterbank untersucht und analysiert: die multikanalige signalangepasste Wavelet-Filterbank (MCFB) [2] und die rationale Wavelet-Filterbank (RWFB) [3].

Bei der MCFB wird der Verlauf des Filters an den Verlauf der gesuchten Defektklasse angepasst. Bei Vorhandensein einer gesuchten Defektklasse auf der Oberfläche korrelieren diese mit den Filtern besonders stark. Anhand der Impulsantwort können die Defekte auf der Oberfläche detektiert und lokalisiert werden. Die Voraussetzungen an ein zulässiges Wavelet werden garantiert, indem ein weiterer Filterkanal entworfen wird, der zum ersten bi-orthogonal ist. Die Filterbank wurde außerdem für die Erkennung von mehreren Defektklassen erweitert. Dazu wurde eine M-kanalige Filterbank mit gleichen Eigenschaften entworfen.

Die MCFB (wie auch „klassische“ Wavelet-Familien) hat die Einschränkung, dass die Skalierung des Filters

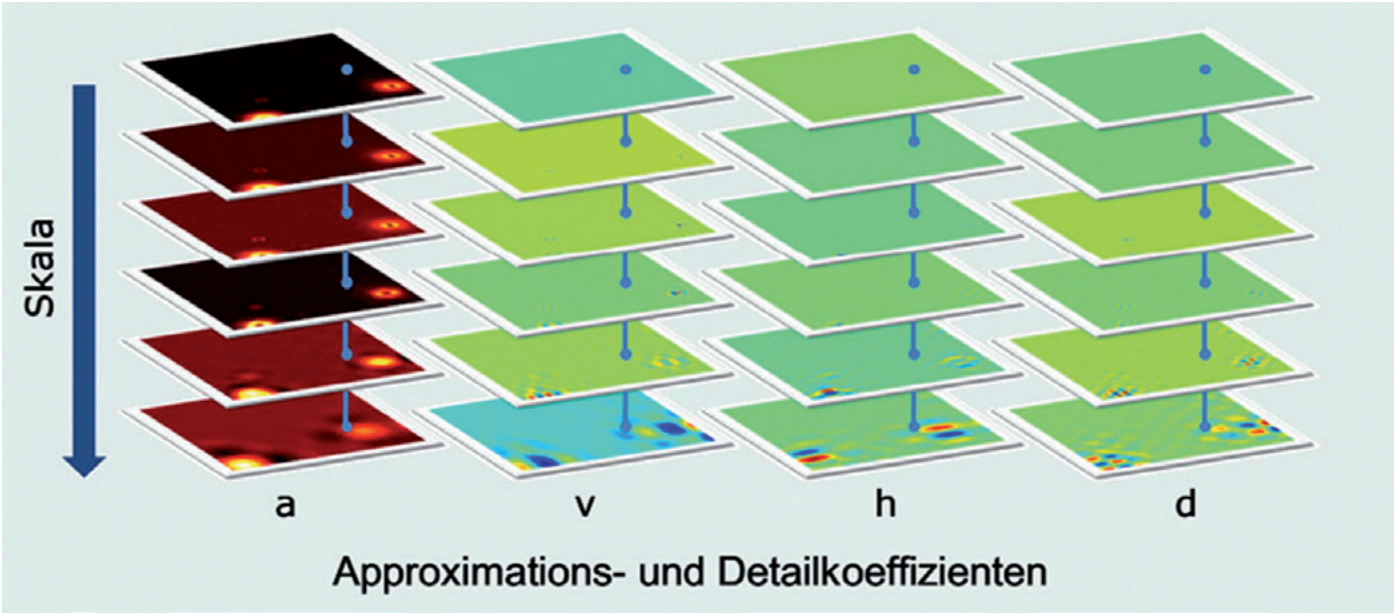

Abb. 1: Illustration der prinzipiellen Vorgehensweise bei der Wavelet-Analyse.

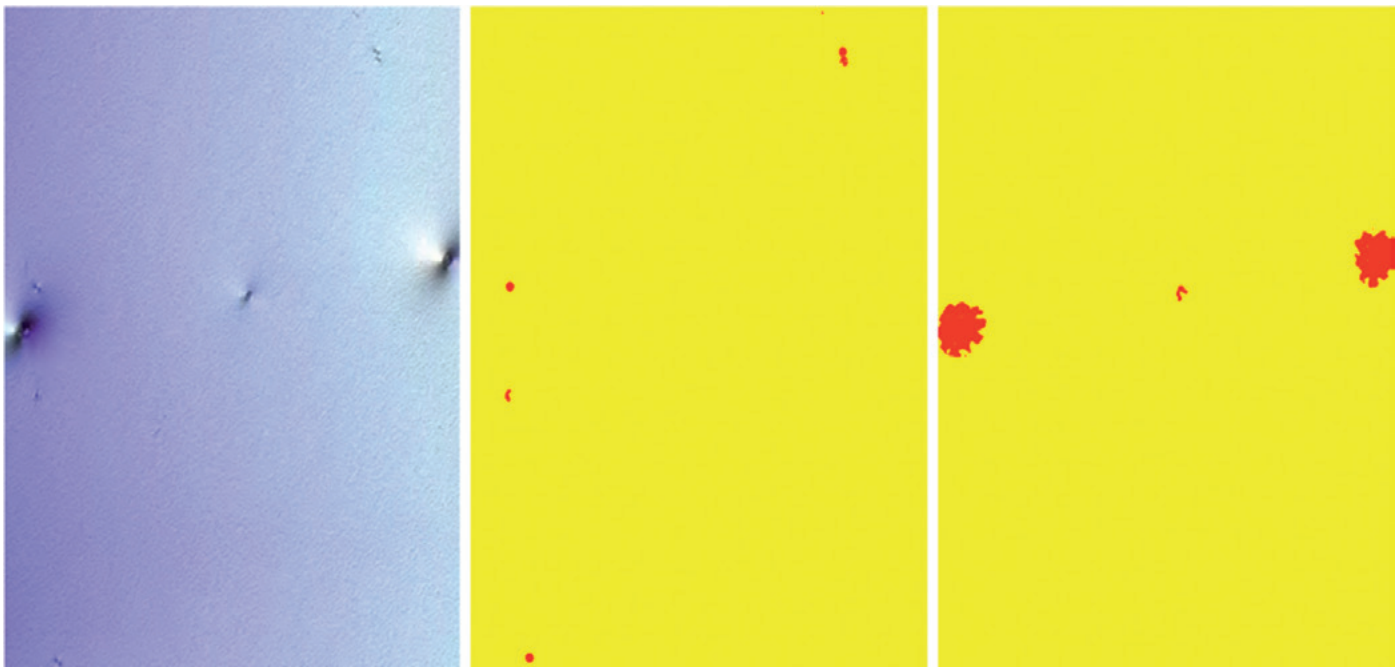

Abb. 2: Deflektometrische Messdaten einer Autotür (links); klassifizierte Lackpickel (mitte) und Dellen (rechts).

wegen der ganzzahligen Sampling-Faktoren eingeschränkt ist. Aus diesem Grund wurde das Entwurfsverfahren der RWFB entwickelt. Bei diesem Verfahren wird die Filterbank sowohl an den Verlauf der gesuchten Defektklasse als auch an die dominanten Ausdehnungen der Defekten angepasst, indem die Sampling-Faktoren entsprechend skaliert werden. Auf diese Weise korreliert die Filterbank mit Defekten einer Klasse in unterschiedlichen Größen, womit sich die Erkennungsleistung erhöhen lässt.

2. Klassifikationsmethode

Nachdem die aufgenommenen Daten mit den entworfenen Wavelet-Filterbänken gefiltert worden sind, können die Ergebnisse als Merkmale an einen Klassifikator weitergegeben werden, der entscheidet, ob ein Defekt vorliegt und welcher Klasse dieser angehört. Für diese Aufgabe wurde ein Klassifikator entworfen, der zunächst mit einem Trainingsdatensatz die Unterteilung des Merkmalsraums lernt. Für jeden Punkt auf der Oberfläche besteht der Merkmalsraum aus den Koeffizienten, die sich aus der Filterantwort des gewählten Wavelets in unterschiedlichen Skalierungen auf die Oberfläche ergeben. Experimente haben gezeigt, dass diese Koeffizienten meist einer Laplace-Verteilung unterliegen [4]. Damit ist es möglich, einen effizienten Bayes'schen Klassifikator zu entwerfen. Außerdem wurde eine Support-Vector-Maschine verwendet, um den Merkmalsraum zu unterteilen. Der Bayes-Klassifikator liefert bereits mit wenigen Lernbeispielen gute Detektions- und Klassifikationsergebnisse. Ein Beispiel für die Detektion von Dellen und Lackpickeln auf einer Automobil-Karosserie ist in Abbildung 2 zu sehen. Es zeigte sich, dass die Filter aus der MCFB und RWFB die Daten besser als klassische Wavelet-Familien detektieren und klassifizieren können [3].

3. Abgleich mit der menschlichen Beurteilung

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit bestand in der Analyse, wie die menschliche Wahrnehmung von Defekten auf spiegelnden Oberflächen mit deren Ausprägung und dem Oberflächenglanzgrad zusammenhängen. Dafür wurde eine Studie [5] durchgeführt. Die Probanden sollten in dieser Studie versuchen, innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums so viele Defekte (beispielhaft wurden Beulen verwendet) wie möglich zu finden. Die Beulen unterschiedlicher Höhe und Ausprägung befanden sich dabei auf schwarz lackierten, ebenen Blechen verschiedener Glanzgrade. Anhand des Testergebnises wurde zum einen die Wahrscheinlichkeit untersucht, mit der die Studienteilnehmer Beulen unterschiedlicher Größe auf einem Blech finden können. Zum anderen wurden die Studienteilnehmer nach ihrer Einschätzung gefragt, wie einfach die ein-

zelnen Fehler für sie zu finden waren. Das Ergebnis der Studie sind parametrierte Modelle zur Ableitung der Wahrnehmungsschwelle von Defekten auf lackierten Blechen, der Detektionswahrscheinlichkeit der Defekte und der subjektiven Bewertung der Defekte durch den Menschen [5].

Fehler; teilweise sind die Strukturen sogar erwünscht, um keine perfekt spiegelnden Oberflächen zu erzeugen, auf denen Defekte wie Lackpickel sehr einfach zu sehen wären. Die Ausprägung der Welligkeiten muss sich daher in einem bestimmten Toleranzbereich befinden. Für die Bewertung dieser

von analytischen Wavelets vorgestellt [8]. Dadurch ist auch eine einfache Synthese der Oberfläche aufgrund der gemessenen Kennzahlen möglich.

In Abbildung 3 (links) ist eine Oberfläche mit zunehmend ausgeprägter Welligkeit von links nach rechts zu sehen.

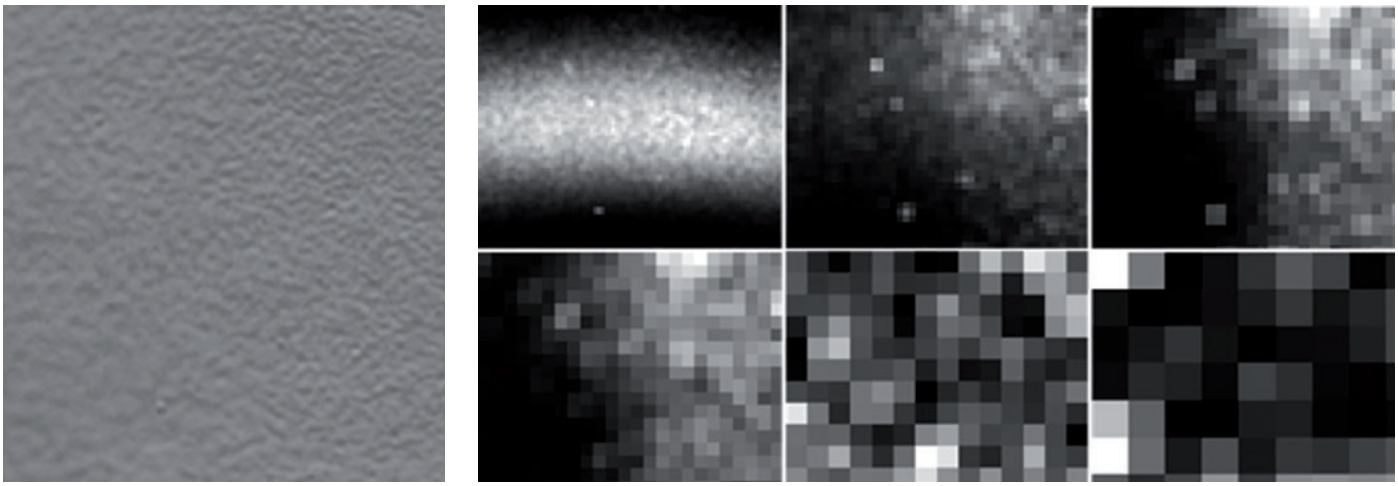

Abb. 3: Deflektometrische Messung einer Oberfläche mit von links nach rechts zunehmender Welligkeit (links) und multiskalige Zerlegung der Welligkeit (rechts, obere Reihe: Skalen 1 bis 3, untere Reihe: Skalen 4 bis 6).

4. Rekonstruktion der Oberfläche

Aus den Koeffizienten der Wavelet-Analyse können sowohl die deflektometrisch vermessene Oberfläche als auch bestimmte Eigenschaften der Oberfläche rekonstruiert werden. Dies wurde für einen Ansatz verwendet, der zur Beurteilung der Oberflächenqualität dient.

Zunächst wurden die hochfrequenten Oberflächenwelligkeiten analysiert, segmentiert und synthetisiert [6]. Diese Welligkeiten (auch Orangenhaut genannt) treten beim Lackierprozess durch ungleichmäßiges Auftragen des Lacks auf, der sich aufgrund einer schnellen Trocknung und geringen Viskosität nicht gleichmäßig verteilt. Die Welligkeiten wirken sich auf das Erscheinungsbild der Oberfläche aus. Dabei sind Welligkeiten nicht immer

Ausprägung wurde ein zweidimensionales Maß aufbauend auf den deflektometrischen Messungen definiert [7].

Außerdem muss die Welligkeit homogen über die Oberfläche erscheinen. Dazu ist eine Segmentierung von Bereichen unterschiedlicher Welligkeiten nötig, was sowohl anhand von Texturmerkmalen als auch mithilfe einer multiskaligen Wavelet-Analyse möglich ist. Während die globale Bewertung der Welligkeit für einen großen Bereich noch mithilfe der Fourier-Transformation möglich ist, müssen für die Segmentierung von Bereichen unterschiedlicher Welligkeiten für jeden Punkt auf der Oberfläche die Ortsfrequenzen berechnet und ausgewertet werden.

Hierzu wurde ein Ansatz zur multiskaligen Analyse der Welligkeiten anhand

Die multiskalige Analyse in Abbildung 3 (rechts) zeigt auf der 1. Skala hauptsächlich Fokusunterschiede bei der Kameraaufnahme (scharfer Bereich in der Mitte zeigt Aliasing-Artefakte), auf der 2. bis 4. Skala zeigen sich die Änderungen in der Welligkeitsausprägung, während auf den höheren Skalen keine Inhomogenität mehr erkennbar ist.

Aufbauend auf den berechneten Kennzahlen können statistisch ähnliche Oberflächen synthetisiert werden, was die Rekonstruktion von realen Oberflächen vereinfacht.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts MID-WAVE wurden Möglichkeiten zur Anwendung der Wavelet-Analyse auf deflektometrische Messungen spiegelnder Oberflächen untersucht. Zur Klassifikation

der Messdaten wurden verschiedene Entwurfsverfahren für die Wavelet-Filterbank vorgestellt, bei denen Vorteile gegenüber klassischen Wavelet-Familien nachgewiesen werden konnten. Außerdem wurde der Zusammenhang zwischen der menschlichen Wahrnehmung der Defekte auf spiegenden Oberflächen einerseits und deren Ausprägungen und dem Glanzgrad der Oberfläche andererseits untersucht. Zudem wurde eine Möglichkeit zur Beurteilung und Synthese von Oberflächenwelligkeiten mithilfe multiskaliger Methoden vorgestellt.

Literaturhinweise:
[1] S. Werling et al., Inspection of Specular and Partially Specular Surfaces, Metrology and Measurement Systems, 2009

[2] T.-T. Le et al., Inspection of Specular Surfaces using Optimized M-channel Wavelets, Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2013

[3] T.-T. Le et al., Optimized size-adaptive feature etraction based on content-matched rational wavelet filters, Proceedings of the 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2014

[4] M. Ziebarth et al., Inspektion spiegelnder Oberflächen mit Wavelet-basierten Verfahren, Forum Bildverarbeitung 2012, KIT Scientific Publishing, 2012

[5] M. Ziebarth, Sichtbarkeit von Dellen und Beulen auf spiegelnden Oberflächen, Forum Bildverarbeitung 2014, KIT Scientific Publishing, 2014

[6] S. Olawsky, Beurteilung von Orangenhaut auf lackierten Blechen mittels Deflektometrie, Karlsruher Institut für Technologie, Masterstudiengang Informatik, Masterarbeit, 2014

[7] M. Ziebarth et al., Obtaining 2D Surface Characteristics from Specular Surfaces, 36th German Conference on Pattern Recognition (GCPR), Springer, 2014

[8] M. Ziebarth, Segmentierung unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten auf lackierten Oberflächen, Forum Bildverarbeitung 2014, KIT Scientific Publishing, 2014

Kontakt:

Dipl.-Inform. Mathias Ziebarth
Karlsruher Institut für Technologie KIT, Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES)

Adenauerring 4
76131 Karlsruhe

Tel. 0721 6091-267

mathias.ziebarth@kit.edu

http://ies.anthropomatik.kit.edu

Dipl.-Inform. Tan-Toan Le
Hochschule Pforzheim, Institut für Angewandte Forschung (IAF)

Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim

tan-toan.le@hs-pforzheim.de

www.hs-pforzheim.de/iaf

Prof. Dr. Thomas Greiner
Hochschule Pforzheim, Institut für Angewandte Forschung (IAF)

Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim

thomas.greiner@hs-pforzheim.de

http://it.hs-pforzheim.de/personen/greiner/greiner.htm

Prof. Dr. Michael Heizmann
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB

Fraunhoferstraße 1
76131 Karlsruhe

michael.heizmann@

iosb.fraunhofer.de
www.iosb.fraunhofer.de/mrd