Segmentierung unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten auf lackierten Oberflächen

Markus Vogelbacher[1], Mathias Ziebarth[1], Sabine Olawsky[1] und Jürgen Beyerer[1,2]

[1] Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Anthropomatik, Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Adenauerring 4, D-76131 Karlsruhe

[2] Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Fraunhoferstraße 1, D-76131 Karlsruhe

Zusammenfassung Die Wahrnehmung lackierter Oberflächen wird sehr stark durch die vorliegenden Oberflächenrauheiten und -welligkeiten beeinflusst. Entscheidend für den visuellen Eindruck ist dabei nicht nur die Ausprägung der Strukturen an sich, sondern auch in wie weit sich diese über die lackierte Fläche verändern. Lokale Änderungen der Oberflächenqualität können dazu führen, dass solche Oberflächen nicht mehr als homogen wahrgenommen werden. Die Einschätzung der Ausprägung der Welligkeiten wird in der Industrie mit Hilfe verschiedener Messinstrumente durchgeführt. Diese ignorieren dabei meist den zweidimensionalen Charakter des Oberflächeneffektes und tasten das optische Profil der Oberfläche nur linienhaft ab. Änderungen in der Ausprägung werden durch Ausgabe der mittleren Ausprägung bzw. durch Anzeige einer Fehlmessung nicht berücksichtigt. In diesem Beitrag werden Methoden vorgestellt, die zum einen die 2D Aufnahme und Auswertung der Ausprägung der Welligkeiten ermöglichen und zum anderen Änderungen in der Welligkeit detektieren. Dazu wird ein deflektometrisches Messsystem verwendet, um das Gradientenfeld der Oberfläche zu erhalten. Durch Auswertung in bestimmten Wellenlängen-/Frequenzbereichen kann damit sowohl eine Vergleichbarkeit zu Standardkenngrößen aus der Industrie als auch eine Segmentierung unterschiedlich ausgeprägter Welligkeiten erreicht werden.

1 Einleitung

Die Lackschicht einer Oberfläche, wie zum Beispiel aus dem Automobilbereich bekannt, dient neben dem Schutz des darunter liegenden Materials auch zur Beeinflussung der Wahrnehmung der Oberfläche. Dabei ist der visuelle Eindruck der Oberfläche sehr stark durch die auftretenden Oberflächenrauheiten und -welligkeiten bestimmt. Die Welligkeiten bzw. die Überlagerung von Strukturen unterschiedlicher Wellenlängen, die auch als Orangenhaut bezeichnet wird, entsteht durch eine ungleichmäßige Abtrocknung des aufgetragenen Lackes während des Lackierprozesses und liegt in der lateralen Größenordnung zwischen 0,1 mm und 10 mm (Abbildung 12.1). Je nach Ausprägung kann der daraus resultierende Oberflächeneindruck als mehr oder weniger störend beurteilt werden. Außerdem können die auftretenden Welligkeiten zum kaschieren kleinerer Defekte genutzt werden.

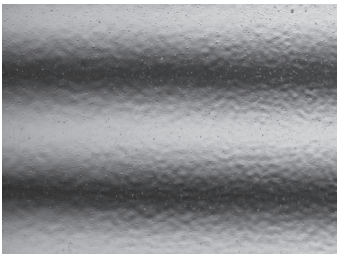


Abbildung 12.1: Visueller Eindruck von Orangenhaut bei Betrachtung eines Streifenmusters.

Insgesamt zeigt sich, dass der Überwachung der Oberflächeneigenschaften eine wichtige Rolle im Bereich der Qualitätskontrolle zuteil wird. Dabei ist es neben der Ableitung von Kenngrößen, die den visuellen Eindruck quantifizieren und dadurch auch Rückschlüsse auf den Lackierprozess ermöglichen sollen, ebenso wichtig die Gleichmäßigkeit der Ausprägung der Welligkeiten über die komplette Oberfläche zu überwachen. Eine lokale Änderung der Ausprägung und damit einhergehend eine Änderung der Abbildungsqualität führt zu einer inhomogenen Wahrnehmung der Oberfläche und kann auch als Defekt angesehen werden. Solche lokalen Änderungen können zum Beispiel durch

ungleichmäßiges Aufbringen des Lackes, beim Polieren der Lackoberfläche oder durch Beschädigungen auftreten.

Im Folgenden wird zunächst in Abschnitt 2 ein Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Beurteilung von lackierten Oberflächen gegeben und in diesem Zusammenhang das in der Industrie häufig verwendete Messgerät wave-scan vorgestellt. Abschnitt 3 beinhaltet das verwendete deflektometrische Messprinzip und die jeweiligen Methoden zur Ableitung einer Kenngröße zur Einschätzung der Ausprägung der Welligkeiten und zur Segmentierung unterschiedlich ausgeprägter Welligkeiten. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4 diskutiert.

2 Stand der Technik

Für die Beurteilung spiegelnder Oberflächen bzw. lackierter Bleche existieren verschiedene Kenngrößen, die die Klarheit der Reflexion beschreiben. Dazu wird die Streuung eines Lichtpunktes nach der spiegelnden Reflexion betrachtet [1, 2]. In diesem Zusammenhang häufig verwendete Kenngrößen beschreiben den Glanzverlust (GLOSS, [1]), Kontrast- bzw. Schärfeverlust (HAZE, [1]) und die Verzerrung des reflektierten Bildes (DOI, [2]). Eine Übersicht wie spiegelnde Oberflächen auf Basis von Lichtstreuung und strukturierten Licht charakterisiert werden können liefert Tian et al. [3]. Pietschmann [4] gibt eine allgemeine Übersicht zur Messung der Wahrnehmung bei lackierten Oberflächen. Weitere Arbeiten verwenden unterschiedlichste Aufnahmesysteme als Grundlage für die Orangenhautbewertung [5–8]. Außerdem sind in der ISO 25178-2:2012 3D Oberflächenkenngrößen definiert, die auch zur Beurteilung herangezogen werden können [9].

Verfahren, die speziell eine Beurteilung in definierten Wellenlängenbereichen verwenden, werden häufig in der Industrie eingesetzt und orientieren sich dabei an der menschlichen Wahrnehmung. Ein einfaches, wenn auch sehr grobes Beispiel dafür ist die Unterteilung des Oberflächenprofils in Shortterm Waviness (SW), für alle Strukturen mit Wellenlängen kleiner als 0,6 mm und Longterm Waviness (LW), für Strukturen mit Wellenlängen zwischen 0,6 und 100 mm. Detaillierter fällt die Betrachtung bei dem von Byk-Gardner speziell zur Beurteilung von Orangenhaut entwickelten Messgerät

wave-scan [10] aus. Dieses Gerät tastet durch Messung der über die Oberfläche reflektierten Lichtintensität einer Punktlichtquelle das optische Profil der Oberfläche eindimensional ab und unterteilt mittels mathematischer Filter das Profil in die für die Beurteilung von Orangenhaut relevanten Wellenlängenbereiche von $\lambda_a = 0,1 \ldots 0,3$ mm, $\lambda_b = 0,3 \ldots 1$ mm, $\lambda_c = 1 \ldots 3$ mm, $\lambda_d = 3 \ldots 10$ mm bis $\lambda_e = 10 \ldots 30$ mm ein. Für Wellenlängenbereiche kleiner 0,1 mm (λ_{du}) wird zusätzlich die Lichtstreuung durch betrachten der Reflexion einer LED mit sehr flachem Einfallswinkel in Bezug zur Flächennormalen bestimmt. In einer vorangegangenen Arbeit wurde diese Art der Kenngrößenbestimmung auch für 2D-Gradientenbilder aus einer deflektometrischen Messung abgeleitet [11].

Änderungen in der Ausprägung der verschiedenen Wellenlängen werden bei den bisher bekannten Verfahren nicht betrachtet.

3 2D-Beurteilung lackierter Oberflächen

3.1 Deflektometrie

Das deflektometrische Messprinzip ermöglicht es Gestaltinformationen spiegelnder Oberflächen zu gewinnen [12, 13]. Dabei zeichnet es sich insbesondere durch eine hohe Empfindlichkeit bezüglich lokaler Oberflächenneigungen aus und ist damit sehr gut geeignet, um die hier vorliegenden wellenartigen Lackstrukturen festzuhalten. Das Messsystem besteht aus einer Kamera *I*, der spiegelnden Oberfläche *S* und einem Schirm *L* (Abbildung 12.2). Die Kamera beobachtet über die spiegelnde Oberfläche den Schirm, auf dem eine Sequenz aus phasenverschobenen horizontalen und vertikalen Sinusmustern abgebildet wird. Dadurch kann jedem Kamerapixel eindeutig ein Schirmpixel zugewiesen werden und die entstehenden Sichtstrahlen hängen nur von der Oberflächennormalen ab. Diese Zuordnung nennt sich deflektometrische Registrierung. Auf Basis dieser Information können die 2D-Gradientenfelder $\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}$ und $\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}$ der Oberfläche $g(x, y)$ erhalten werden.

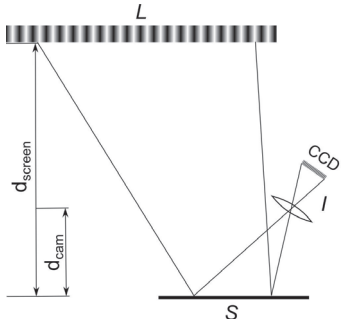


Abbildung 12.2: Deflektometrisches Messsystem bestehend aus Kamera I, spiegelnder Oberfläche S und Schirm mit Sinusmuster L.

3.2 Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächencharakteristik

Aus der Fouriertransformation der aus der deflektometrischen Messung gewonnenen Gradientenfelder $\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}$ und $\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}$ (Abbildung 12.3) können durch Verwendung des Winkelleistungsspektrums (APS) Kenngrößen zur Beschreibung des Orangenhauteffektes gewonnen werden [11]. Nach ISO 25178-2:2012 ist das Winkelleistungsspektrum für ein Frequenzband $f_i = {}^1\!/\lambda_i$ definiert als

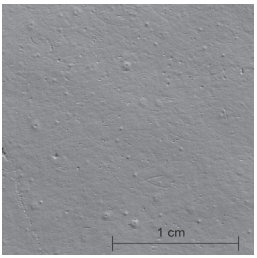
$$\mathrm{APS}_i(\vartheta) = \int\limits_{f_i} r \left|\mathcal{F}\{g\}(r\sin(\vartheta), r\cos(\vartheta))\right|^2 \,\mathrm{d}r. \tag{12.1}$$

r und ϑ beschreiben die Polarkoordinaten zu den zugehörigen kartesischen Koordinaten f_x und f_y des Frequenzspektrums. Durch Verwendung der Fourierkorrespondenz der Ableitung

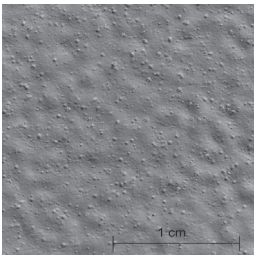
$$G_x(f_x, f_y) := \mathcal{F}\Big\{\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}\Big\} = \mathrm{j}2\pi f_x \mathcal{F}\{g(x,y)\}, \tag{12.2}$$

ergibt sich

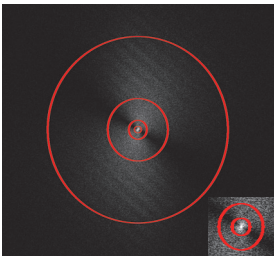
$$\begin{aligned}\mathrm{APS}_i(\vartheta) = \int\limits_{f_i} \frac{1}{4\pi^2 r}\Big(&\left|G_x(r\sin(\vartheta), r\cos(\vartheta))\right|^2 \\ &+ \left|G_y(r\sin(\vartheta), r\cos(\vartheta))\right|^2\Big)\,\mathrm{d}r\end{aligned} \tag{12.3}$$



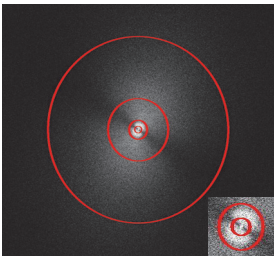
(a) lackierte Oberfläche ohne Orangenhaut



(b) lackierte Oberfläche mit Orangenhaut



(c) Frequenzspektrum für Oberfläche ohne Orangenhaut



(d) Frequenzspektrum für Oberfläche mit Orangenhaut

Abbildung 12.3: Gradientenbilder von lackierten Oberflächen ohne (a) und mit Orangenhaut (b) und zugehörige Frequenzspektren (c,d). Rote Kreise zeigen die Grenzfrequenzen $1/0{,}1\,\mathrm{mm}$, $1/0{,}3\,\mathrm{mm}$, $1/1\,\mathrm{mm}$, $1/3\,\mathrm{mm}$ und in den vergrößerten Ausschnitten rechts unten in (c) und (d) die Grenzfrequenzen $1/1\,\mathrm{mm}$ und $1/3\,\mathrm{mm}$.

Da eine Vorzugsrichtung nicht zu erkennen und auch nicht von Interesse ist bei der Betrachtung von Orangenhaut, kann über alle Winkel ϑ integriert werden

$$\mathrm{BPS}_i = \int_0^{2\pi} \mathrm{APS}_i(\vartheta)\,\mathrm{d}\vartheta. \tag{12.4}$$

Werden diese Kenngrößen für die Frequenzbereiche des wave-scan bestimmt, also $i \in \{du, a, b, c, d, e\}$, so können die erhaltenen BPS Werte auf die Kenngrößen des wave-scan übertragen werden [11] und damit

eine Beurteilung ermöglicht, ob eher lang- oder kurzwellige Strukturen die Oberfläche dominieren.

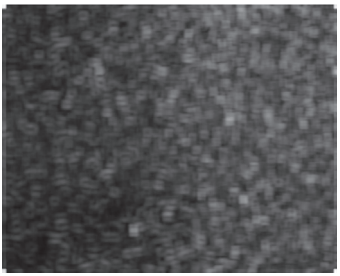
3.3 Segmentierung von Welligkeitsänderungen

Im Bereich der Texturanalyse würde das Gradientenfeld einer Oberfläche mit den betrachteten Welligkeiten dem statistischen Texturtyp zugeordnet werden. Aus diesem Grund kann man zur Detektion von Bereichen unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten (Abbildung 12.4(a)) verschiedene statistische Kenngrößen heranziehen. Zuvor ist es allerdings notwendig Fokusunterschiede, die sich aus der Objekt-Kamerakonstellation ergeben, in den Messungen auszugleichen. In Abbildung 12.4(a) zeigt sich dieser Effekt durch einen verrauschten Bereich in der mittleren Horizontalen des Gradientenbildes. Um dies auszugleichen, kann ein Medianfilter angewandt werden (Abbildung 12.4(b)). Für das so bereinigte Gradientenbild wird im nächsten Schritt die lokale Standardabweichung innerhalb einer definierten Nachbarschaft bestimmt (Abbildung 12.4(c)). Kurzwellige Bereiche führen in diesem Zusammenhang zu einer größeren lokalen Standardabweichung. Durch Anwendung eines Mittelwertfilters entsprechender Größe können Bereiche mit ähnlicher Welligkeitsausprägung zusammengefasst werden (Abbildung 12.4(d)). Dadurch können Ausprägungsverläufe sichtbar gemacht werden und je nach Vorgabe unterschiedliche Bereiche definiert werden.

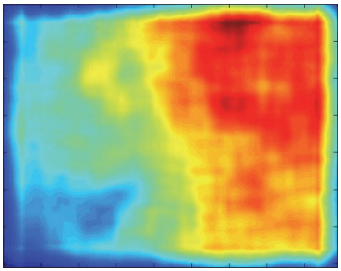
Wie in Abschnitt 2 angedeutet repräsentiert die Betrachtung unterschiedlicher Frequenzbereiche auch in gewisser Weise die menschliche Wahrnehmung. Mit Hilfe der zuvor definierten Frequenzbereiche und der Wavelettransformation kann dies auch für die Segmentierung eingebracht werden. Nach Unterdrückung kleinerer Defekte, wird auf das Gradientenfeld eine kontinuierliche Wavelettransformation durchgeführt [14]. Als Wavelet wird in diesem Fall ein Mexican Hat Wavelet verwendet und über die Pseudofrequenz der Waveletfunktion die betrachteten Skalierungen an bestimmte Frequenzen angepasst. Konkret werden die Frequenzen enstprechend den Grenzen bzw. der Mitte der Frequenzbereiche des wave-scan gewählt, nämlich $10\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}, 6,67\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}, 2,17\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}, 0,67\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}, 0,22\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}$ und $0,1\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}$. Anschließend wird auf den erhaltenen Skalen die lokale Energie in einer der Skalierung angepassten Nachbarschaft berechnet. Nach

(a) Gradientenfeld der betrachteten Oberfläche

(b) Anwendung eines Medianfilters zur Beseitigung von Fokusunterschieden



(c) Bestimmung der lokalen Standardabweichung



(d) Detektionsergebnis nach Mittelwertfilterung

Abbildung 12.4: Beispiel für die Detektion von Bereichen unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten mittels lokaler Standardabweichung. (d) zeigt in einer Falschfarbendarstellung den Übergang von links, dem langwelligen Bereich (blau), nach rechts, dem kurzwelligen Bereich (rot) der betrachteten Oberfläche.

Glättung der Energiebilder durch einen Gaußfilter, können letztendlich Bereiche mittels eines Region Growing Algorithmus [15] segmentiert werden (Abbildung 12.5).

4 Diskussion der Ergebnisse

In [11] kann die Eignung der gewonnenen 2D-Kenngrößen aus der deflektometrischen Messung nachvollzogen werden. Es wird ein Vergleich zwischen den BPS Werten und den Kenngrößen der wave-scan Mes-

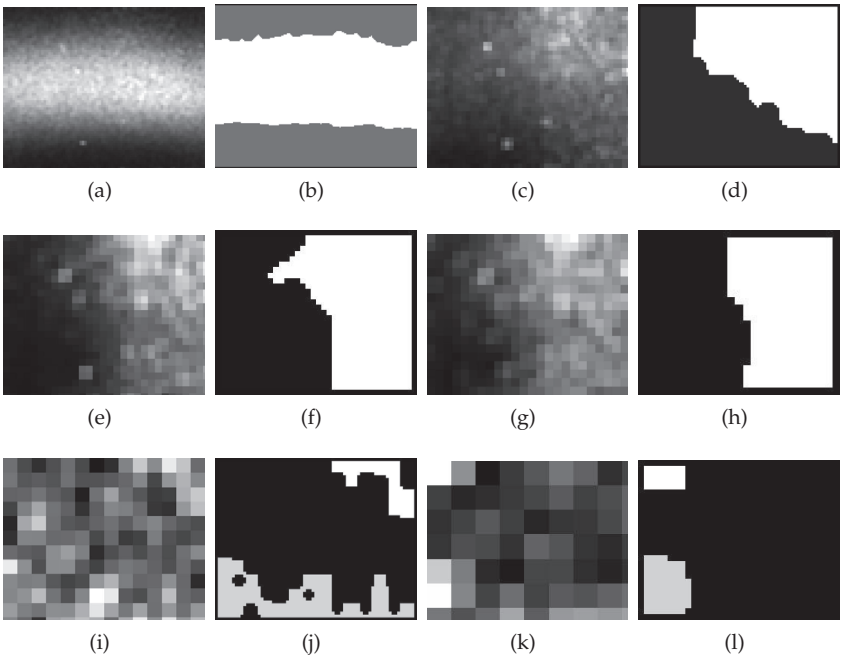
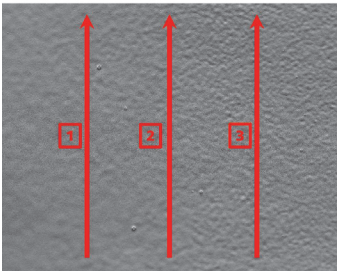


Abbildung 12.5: Beispiel für die Detektion von Bereichen unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten mittels kontinuierlicher Wavelettransformation für das Gradientenfeld aus Abbildung 12.4(a) und den entsprechenden Pseudofrequenzen der Skalen (a,b) $10\ {}^{1}/_{\mathrm{mm}}$, (c,d) $6,67\ {}^{1}/_{\mathrm{mm}}$, (e,f) $2,17\ {}^{1}/_{\mathrm{mm}}$, (g,h) $0,67\ {}^{1}/_{\mathrm{mm}}$, (i,j) $0,22\ {}^{1}/_{\mathrm{mm}}$ und (k,l) $0,1\ {}^{1}/_{\mathrm{mm}}$. Für die jeweiligen Skalen ist links die lokale Energie und rechts das Segmentierungsergebnis dargestellt.

sung für Testbleche mit unterschiedlichen Glanzgraden und Orangenhautausprägungen durchgeführt.

Auch für die Segmentierung können wave-scan Messungen herangezogen werden, um die Korrektheit der Ergebnisse zu bestätigen. Dazu sind allerdings mehrere solcher wave-scan Messungen notwendig. Wird für die Oberfläche aus Abbildung 12.4(a) wie in Abbildung 12.6(a) dargestellt an drei Stellen eine wave-scan Messung durchgeführt, so sind deutliche Veränderungen in den vom wave-scan gelieferten Kenn-



(a) Referenzierung der wave-scan Messungen auf die deflektometrische Messung

	B	W_{du}	W_a	W_b	W_c	W_d	W_e
1	6,9	60,5	68	61,3	32	29,1	19,1
2	6,5	61,3	69,7	65	46,6	35	18
3	8,3	62,2	69,7	72,3	56,4	35	25,3

(b) Kenngrößen der wave-scan Messungen

Abbildung 12.6: Auswertung des Oberflächenabschnittes aus Abbildung 12.4(a) mittels wave-scan. W_{du} bis W_e beschreiben die Kenngrößen der entsprechenden Wellenlängenbereiche. B wird als Balancewert bezeichnet, ein von Byk-Gardner aus einer Studie hergeleitete Kenngröße, die die Kenngrößen W_b und W_d kombiniert, um die subjektive Wahrnehmung der Orangenhaut zu beschreiben.

größen für diese Messbereiche und damit in den unterschiedlichen Wellenlängebereichen zu erkennen (Abbildung 12.6(b)). Möchte man eine feinere Auflösung der Änderung in der Ausprägung, wären mehr Messpunkte notwendig. Durch Verwendung der 2D deflektometrischen Messung und mit Hilfe der lokalen Standardabweichung können diese Ergebnisse in einer Messung gewonnen werden (Abbildung 12.4(d)). Für eine automatische Auswertung können damit Bereiche definiert werden, in denen eine Kenngrößenschwankung nur in einem vorher festgelegten Bereich vorliegen. Somit ist eine sehr feine Auflösung möglich und es wird verhindert, dass Ausprägungsänderungen herausgemittelt werden, wie es zum Beispiel beim wave-scan der Fall wäre. Bei der Betrachtung der Segmentierung auf unterschiedlichen Skalen der Wavelettransformation zeigt sich, dass vor allem die Pseudofrequenzen bei $2,17\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}$ und $0,67\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}$ (Abbildung 12.5 (e-h)) für eine Segmentierung unterschiedlicher Wellenlängenausprägungen geeignet sind. Die Skala der Pseudofrequenz bei $10\,{}^{1}/_{\mathrm{mm}}$ (Abbildung 12.5 (a,b)) könnte wiederum verwendet werden, um den Kamerafokus zu bestimmen. Die übrigen Skalen zeigen sich als ungeeignet für die Bestimmung von Ausprägungsänderungen.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Verfahren vorgestellt, die es ermöglichen verschiedene Ausprägungen der Orangenhaut auf lackierten Blechen festzustellen und zu segmentieren. Da dies ein zweidimensionaler Effekt ist, wird im Gegensatz zu den bekannten Messinstrumenten ein flächiges Messverfahren, die Deflektometrie, verwendet. Auf Grundlage der aus der Deflektometrie erhaltenen Gradientenbilder der Oberfläche können zum einen über das Frequenzspektrum und das Winkelleistungsspetrum die 1D Kenngrößen aus der Industrie bekannter Orangenhautmessgeräte abgeleitet und zum anderen Ausprägungsänderungen der vorhandenen Wellenlängen detektiert werden. Für die einfache Detektion von Ausprägungsänderungen ist es dabei ausreichend die lokale Standardabweichung des Gradientenbildes auszuwerten. Eine wellenlängenabhängige Segmentierung kann mittels der Betrachtung der Skalen einer kontinuierlichen Wavelettransformation für bestimmte Pseudofrequenzen und der Auswertung der lokalen Energie erreicht werden.

Aus der Kombination von Kenngrößenbestimmung und Detektion von Bereichen unterschiedlich ausgeprägter Wellenlängen wird es damit möglich in einer Messung flexibel Bereiche gleicher Ausprägung festzulegen und die entsprechenden Kenngrößen anzugeben. Lokale Abweichungen von einer ansonsten homogenen Lackschicht können somit als Fehler detektiert werden. Insgesamt wird dadurch die Auswertung von Kenngrößen auf Grund der 2D-Daten schneller und robuster. Eine gleichwertige Auswertung der Oberfläche zum Beispiel mit dem wave-scan würde eine Vielzahl an Messungen benötigen und könnte auf Grund der Mittelwertbildung über einen definierten linienhaften Oberflächenabschnitt zu Fehlern führen.

Literatur

1. G. Kigle-Boeckler, „Measurement of gloss and reflection properties of surfaces“, *Metal Finishing*, S. 28–31, 1995.
2. M.-K. Tse, D. Forrest und E. Hong, „An improved method for distinctness of image (doi) measurements“, Quality Engineering Associates (QEA), Inc., Burlington, MA, USA, Tech. Rep., 2005.

3. G. Tian, R. Lu und D. Gledhill, „Surface measurement using active vision and light scattering“, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45, Nr. 1, S. 131–139, 2007.
4. J. Pietschmann, *Industrielle Pulverbeschichtung*. Vieweg+Teubner, 2010, Vol. 3.
5. T. Fletcher, „A simple model to describe relationships between gloss behaviour, matting agent concentration and the rheology of matted paints and coatings“, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 44, S. 25–36, 2002.
6. M. Miranda-Medina, T. Wagner, J. Böhm, A. Vernes und K. Hingerl, „Optical analysis of orange peel on metallic surfaces“, in *Proceedings of SPIE Optical Micro- and Nanometrology IV*, 2012.
7. M. Osterhold, „Characterization of surface structures by mechanical and optical fourier spectra“, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 27, S. 195–200, 1996.
8. A. F. R.-S. Lu, „3d surface topography from the specular lobe of scattered light“, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45, S. 1018–1027, 2007.
9. S. Rebeggiani, B.-G. Rosén und A. Sandberg, „A quantitative method to estimate high gloss polished tool steel surfaces“, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 311, Nr. 1, 2011.
10. „BYK-Gardner GmbH, Orange Peel and DOI Meters“, https://www.byk.com/en/instruments/products/appearance-measurement/orange-peel-doi-meter.html, accessed on 2014-02-13.
11. M. Ziebarth, M. Vogelbacher, S. Olawsky und J. Beyerer, „Obtaining 2d surface characteristics from specular surfaces“, in *German Conference on Pattern Recognition*, 2014.
12. D. Pérard, „Automated visual inspection of specular surfaces with structured-lightning reflection techniques“, Dissertation, University of Karlsruhe, 2000.
13. S. Werling, M. Mai, M. Heizmann und J. Beyerer, „Inspection of specular and partially specular surfaces“, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 16, S. 415–431, 2009.
14. S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing, Third Edition: The Sparse Way*, 3. Aufl. Academic Press, 2008.
15. R. Adams und L. Bischof, „Seeded region growing“, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 16, Nr. 6, S. 641–647, Jun 1994.