

Patzelt, Stefan ; Stehno, Christian ; Stöbener, Dirk ; Ströbel, Gerald ; Fischer, Andreas

**In-Prozess-Charakterisierung spiegelnder Oberflächen mit Laserstreulicht und leistungsfähiger Hardware**

Journal Article as: peer-reviewed accepted version (Postprint)

DOI of this document\* (secondary publication): <https://doi.org/10.26092/elib/3302>

Publication date of this document: 13/09/2024

\* for better findability or for reliable citation

**Recommended Citation (primary publication/Version of Record) incl. DOI:**

Patzelt, S., Stehno, C., Stöbener, D., Ströbel, G. & Fischer, A. (2017). In-Prozess-Charakterisierung spiegelnder Oberflächen mit Laserstreulicht und leistungsfähiger Hardware. *tm - Technisches Messen*, 84(9), 557-567. <https://doi.org/10.1515/teme-2016-0075>

Please note that the version of this document may differ from the final published version (Version of Record/primary publication) in terms of copy-editing, pagination, publication date and DOI. Please cite the version that you actually used. Before citing, you are also advised to check the publisher's website for any subsequent corrections or retractions (see also <https://retractionwatch.com/>).

Dies ist ein akzeptiertes Manuskript eines bei De Gruyter in der Zeitschrift *tm - Technisches Messen* am 24.02.2017 veröffentlichten Artikels, verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/teme-2016-0075>. Es unterliegt den Nutzungsbedingungen der Lizenz Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), die die nicht kommerzielle Wiederverwendung, Verbreitung und Vervielfältigung über ein beliebiges Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert und in keiner Weise verändert, umgewandelt oder ergänzt wird. Wenn Sie dieses Manuskript für kommerzielle Zwecke verwenden möchten, wenden Sie sich bitte an [rights@degruyter.com](mailto:rights@degruyter.com)

This document is made available under a Creative Commons licence.

The license information is available online: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

**Take down policy**

If you believe that this document or any material on this site infringes copyright, please contact [publizieren@suub.uni-bremen.de](mailto:publizieren@suub.uni-bremen.de) with full details and we will remove access to the material.

Stefan Patzelt\*, Christian Stehno, Dirk Stöbener, Gerald Ströbel und Andreas Fischer

# In-Prozess-Charakterisierung spiegelnder Oberflächen mit Laserstreulicht und leistungsfähiger Hardware

In-process characterization of specular surfaces with scattered laser light and hardware acceleration

**Zusammenfassung:** Laserstreulichtmessungen auf der Basis von Specklekorrelationsverfahren charakterisieren Gestaltabweichung opaker, technischer Oberflächen auf der Mikro- und Nanometerskala. Anhand eines einzigen Streulichtbildes lässt sich die Rauheit eines mit Laserlicht beleuchteten Oberflächenbereiches mit mehreren Millimetern Durchmesser quantitativ bewerten. Mit hohen Laser-Lichtleistungen, kurzen Belichtungszeiten und einer Kamera mit hoher Bildrate lassen sich in laufenden Fertigungsprozessen „scharfe“ Bilder erzeugen, die für die rauheitsbezogene Bildauswertung geeignet sind. Die Bildauswertelgorithmen lassen sich für die Implementierung auf einer leistungsfähigen Hardware (FPGA – Field Programmable Gate Array) anpassen. Dies ermöglicht fertigungsnahe und In-Prozess-Rauheitsmessungen an technischen Oberflächen in Echtzeit mit einer Messrate von über 1,3 kHz und einer lückenlosen Oberflächenabdeckung von nahezu 4 m<sup>2</sup>/min bei einer Bewegungsgeschwindigkeit von 1600 m/min. Der vorliegende Beitrag beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise eines In-Prozess-Laserstreulichtmesssystems für die Charakterisierung schnell bewegter, spiegelnder Oberflächen und stellt erste Messergebnisse vor.

**Schlüsselwörter:** Oberflächen, Rauheit, Messtechnik, Laser, Streulicht, Speckle, Hardwarebeschleunigung, FPGA.

---

\*Korrespondenzautor: **Stefan Patzelt**, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Str. 13, D-28359 Bremen, E-Mail: pa@bimaq.de

**Christian Stehno:** CoSynth GmbH & Co. KG, Marie-Curie-Str. 1, D-26129 Oldenburg

**Dirk Stöbener, Gerald Ströbel, Andreas Fischer:** Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Str. 13, D-28359 Bremen

**Abstract:** Scattered laser light measurements based on speckle correlation methods characterize form deviations of opaque technical surfaces in the micrometer and nanometer scale. A single scattered light image of a laser illuminated surface area with several millimeters in diameter enables a quantitative assessment of the surface roughness. High power laser modules, short exposure times and a digital camera with a high frame rate produce “sharp” images in running productions processes, which are suitable for a roughness based image evaluation. The image processing algorithms will be adapted for the implementation on a high-performance hardware (FPGA – Field Programmable Gate Array). This allows near to the process and in-process real time roughness measurements with a measuring rate exceeding 1.3 kHz and a complete surface coverage of nearly 4 m<sup>2</sup>/min at a moving velocity of 1600 m/min. This contribution describes the set-up and the operating mode of an in-process scattered laser light measuring system for the characterization of fast moving, specular surfaces, and presents first measuring results.

**Keywords:** Surface, roughness, metrology, laser, scattered light, speckle, hardware acceleration, FPGA.

## 1 Einleitung

Die Funktion technischer Bauteile hängt unmittelbar mit den tribologischen und/oder den optischen Eigenschaften ihrer Oberflächen zusammen. Die Charakterisierung und quantitative Bewertung technischer Oberflächen basiert auf Gestaltabweichungen (DIN 4760). Die Form und die Welligkeit beschreiben langwellige Gestaltabweichungen, deren räumliche Ausdehnung deutlich größer als die Tiefe ist (Aspektverhältnis > 100 : 1). Die Rauheit kennzeichnet kurzwellige, regelmäßig oder unregelmäßig wiederkehrende Unebenheiten der Ist-Oberfläche mit einem Aspektverhältnis zwischen 100 : 1 und 5 : 1. Konventionelle mechanische und optische Rauheitsmessgeräte erfassen Oberflächenhöhenwerte entweder entlang einer Li-

nie (z. B. Tastschnittgerät) oder dreidimensional flächenhaft (z. B. Konfokalmikroskop, Weißlicht-Interferometer). In lateral oder vertikal scannenden Messprozessen werden Oberflächenhöhenwerte entweder sequentiell erfasst oder mittels Auswertung sequentiell aufgenommener Kamerabilder ermittelt. Daraus lassen sich eine Vielzahl von 2D- bzw. 3D-Oberflächenkenngrößen berechnen (ISO 4287, ISO 13565-2 bzw. ISO 25178). Aufgrund der scannenden Messdatenerfassung ist eine schwingungsarme Messumgebung oder ein Messlabor erforderlich. Dies steht einer 100%-Prüfung aller Bauteile eines Fertigungsprozesses bzw. aller Bauteilflächen zu vertretbaren Kosten entgegen.

Streulichtspeckle-Messverfahren überwinden diese Einschränkung [1]. Die Rauheit eines mit Laserlicht beleuchteten Oberflächenbereiches mit mehreren Millimetern Durchmesser lässt sich anhand eines einzigen Bildes der resultierenden Speckle-Intensitätsverteilung integral bewerten. Mit Laser-Lichtleistungen kleiner als 100 mW, Lichtpulsen bzw. Belichtungszeiten im Mikrosekundenbereich und einer Kamera, welche eine Bildrate im Kiloherzbereich erlaubt, lassen sich in laufenden Fertigungsprozessen „scharfe“ Bilder für eine rauheitsbezogene Bildauswertung erzeugen. Gleichzeitig lassen sich die Bildauswertelgorithmen für die Implementierung auf einer leistungsfähigen Hardware (FPGA – Field Programmable Gate Arrays) anpassen, welche unter Berücksichtigung der Bildrate und der Algorithmenkomplexität eine Echtzeitauswertung ermöglicht. Dies prädestiniert Streulicht-Messverfahren für den fertigungsnahen Einsatz an technischen Oberflächen.

Hier setzt der Beitrag an und stellt die theoretischen und experimentellen Arbeiten vor, die es ermöglichen, die Rauheit von Oberflächenarealen in der Größenordnung von bis zu  $4 \text{ m}^2/\text{min}$  mit einer Auflösung von  $\Delta \text{Sq} < 1 \text{ nm}$  zu charakterisieren. Die Anwendung zielt insbesondere auf Rauheitsmessungen in der laufenden Bandstahlfertigung ab, wobei die Stahlbänder bei Geschwindigkeiten von bis zu  $300 \text{ m}/\text{min}$  reduziert und dressiert werden. Die genannte Oberflächenabdeckung wird durch zeitlich und räumlich unmittelbar aneinander gereihete Einzelmessungen am bewegten Stahlband mit Gesichtsfeldabmessungen von maximal  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  und eine Messrate von mindestens  $333 \text{ Hz}$  erreicht. Kleinere Gesichtsfeldabmessungen erlauben Messraten von bis zu  $1332 \text{ Hz}$ . Im Zentrum steht dabei die Auswahl einer hierfür geeigneten Laserlichtquelle sowie einer Digitalkamera. Eine geeignete Laserlichtquelle zeichnet sich neben der Lichtwellenlänge und der Lichtleistung durch eine hochfrequente Modulierbarkeit der Laserintensität und ein möglichst gaußförmiges Intensitätsprofil aus. Um verwischungsfreie Specklebilder schnell bewegter Oberflächen zu erzeugen,

ist eine Messprozesssteuerung erforderlich, welche die Kamera bei höchster Bildrate und kürzester Belichtungszeit mit der Pulsweitenmodulation des Lasers synchronisiert.

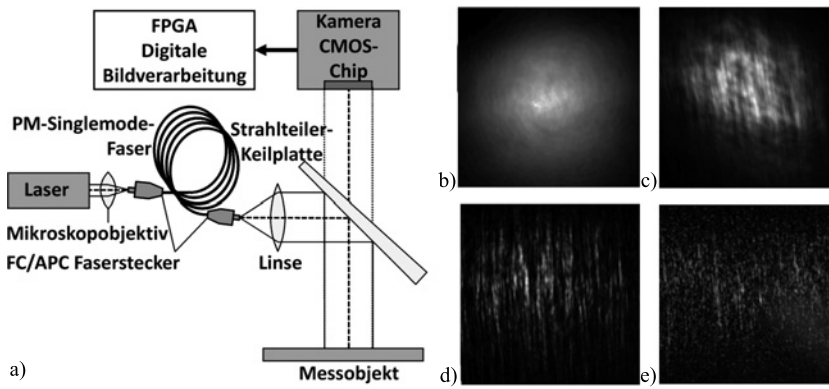
Die komplexe und rechenintensive, rauheitsbezogene Bildauswertung basiert auf Korrelationsverfahren, die sich in unterschiedlicher Weise mathematisch umsetzen lassen. Der Vergleich und die Bewertung verschiedener Ansätze erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Portierbarkeit auf eine sehr schnelle, parallel arbeitende Hardware. Dabei kommen FPGAs zum Einsatz, welche eine extrem schnelle und massiv parallele Verarbeitung von mehreren 100 Digitalbildern pro Sekunde in einem sehr kompakten und robusten System erlauben.

## 2 Streulichtspeckle-Messtechnik

Die Oberflächen-Charakterisierung mit Laserstreulicht-Messverfahren basiert auf statistischen Eigenschaften von Speckle-Intensitätsverteilungen, die sich im Fernfeld des Streulichts einer mit kohärentem Licht beleuchteten technischen Oberfläche ausbilden [2]. Unter der idealisierten Annahme eines kollimierten Beleuchtungsstrahls mit ebener Wellenfront und gaußscher Intensitätsverteilung und einer idealen, optisch glatten Messobjektoberfläche wird ein senkrecht einfallender Lichtstrahl spiegelnd reflektiert. Der Kamerasensor detektiert die unveränderte, gaußsche Intensitätsverteilung des Laserstrahls. Eine raue Oberfläche beeinflusst die Phase des einfallenden Lichts. Der nunmehr diffus reflektierte Lichtstrahl ist leicht divergent. Die Wellenfront ist nicht mehr eben. Dies führt zu lokalen Modulationen der ursprünglich gaußförmigen Intensitätsverteilung des Beleuchtungsstrahls. Der Sensor detektiert innerhalb des einhüllenden gaußschen Intensitätsprofils Lichtflecken (Speckles). Der Messeffekt besteht darin, dass der Helligkeitsunterschied zwischen den hellen Lichtflecken und den dunkleren Zwischenbereichen mit der Oberflächenrauheit zunimmt. Der Specklekontrast  $K_{Sp}$  nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Partiiell ausgeprägte Speckles mit  $K_{Sp} < 1$  entstehen, wenn Laserlicht an Oberflächen gestreut wird, deren flächenbezogener quadratischer Mittenrauwert

$$\text{Sq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (1)$$

kleiner als ein Achtel der Lichtwellenlänge  $\lambda$  ist [3]. Gleichung (1) drückt die Standardabweichung der Oberflächenhöhen  $z(x, y)$  eines Oberflächenbereiches mit der Fläche  $A$  aus. Die obere Messbereichsgrenze des Streulichtmessverfahrens ist dadurch festgelegt, dass rauere Oberflächen mit  $\text{Sq} > \lambda/8$  voll ausgeprägte Specklemuster



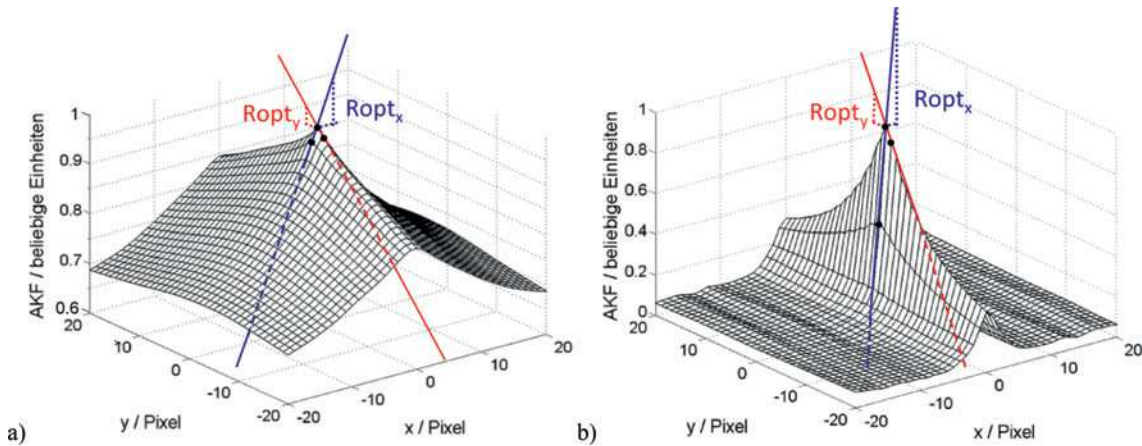
**Abbildung 1:** Schema des Rauheitsmesssystems (a) nach dem Verfahren der raueitsabhängigen partiellen Ausprägung monochromatischer Speckle-Intensitätsverteilungen sowie gemessene, monochromatische Laserstreulichtmuster polierter Oberflächen mit den Sa-Rauheitswerten b) 3 nm, c) 12,5 nm, d) 50 nm und e) 100 nm.

mit einem Specklekontrast  $K_{Sp} \approx 1$  erzeugen, deren statistisches Erscheinungsbild keine raueitsabhängigen Veränderungen aufweist. Mit sichtbarem Laserlicht charakterisiert dieses Messverfahren somit spiegelnd glatte bis diffus spiegelnde (matte) Oberflächen im Rauheitsbereich  $1 \text{ nm} < S_q < 100 \text{ nm}$ .

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Streulicht-Messsystems, welches auf dem physikalischen Effekt der raueitsabhängigen partiellen Ausprägung monochromatischer Streulicht-Speckles beruht. Da der Messeffekt in einer mit der Rauheit zunehmenden Intensitätsmodulation des von Oberflächen diffus reflektierten Laserstrahls besteht, soll der Beleuchtungslaserstrahl ein nahezu ideales, gaußsches Intensitätsprofil aufweisen. Lasermodule auf Basis von Halbleiterlasern erfüllen diese Anforderung nicht. Sie enthalten optische Komponenten (Linsen, Prismen), welche den divergenten, ovalen, aus der Laserdiode austretenden Lichtstrahl zu einem mehr oder weniger kreisrunden, kollimierten Strahl formen. Die Qualität der optischen Bauteile ist zumeist gering. Der resultierende Lichtstrahl weist eine inhomogene Intensitätsverteilung auf. Grundsätzlich ist ein solcher Lichtstrahl für die streulichtbasierte Rauheitsmessung geeignet. Jedoch führen die inhärenten Intensitätsstrukturen im Zuge der Streulichtbildauswertung zu größeren optischen Rauheitsmesswerten für glatte Oberfläche, während die obere Messbereichsgrenze unverändert bleibt. Dies reduziert die Auflösung des Messverfahrens. Um das Intensitätsprofil des Laserstrahls einer Normalverteilung anzunähern, ist eine Raumfilterung erforderlich. Eine Raumfilteranordnung bestehend aus einer Fokussierungslinse, einer Raumfilterblende (Pinhole) und einer Kollimationslinse liefert in diesem Fall jedoch unbefriedigende Ergebnisse. Laserdiodenmodule emittieren häufig nicht-kreisförmige Lichtstrahlen mit eher kastenförmigem Intensitätsprofil, welche sich nicht scharf auf eine Lochblende fokussieren lassen. Wählt man einen ausreichend großen Blendendurchmesser, sodass der Lichtstrahl na-

hezu ungehindert durch die Blende hindurchtritt, dann ist die Tiefpassfilterung in der Raumfrequenzebene unzureichend. Die Intensitätsverteilung hinter der Blende ist inhomogen. Eine kleinere Lochblende mit angemessener Tiefpassfilterwirkung erzeugt aufgrund des teilweise beleuchteten Blendenrandes unerwünschte Beugungseffekte. Daher wird ein alternativer Ansatz für ein optisches Raumfilter gewählt. Der näherungsweise kollimierte Lichtstrahl des Laserdiodenmoduls wird in eine polarisationserhaltende Singlemode-Faser eingekoppelt. Die Faserendflächen sind mit einem  $8^\circ$  Schrägschliff (FC/APC-Faserstecker) versehen, sodass keine Reflexe in Richtung der optischen Achse auftreten. Aufgrund der unter den genannten Randbedingungen unscharfen Fokussierung auf die Faserstirnfläche gelangt das Licht sowohl in den Faserkern mit dem Durchmesser von  $3 \mu\text{m}$  als auch in den Fasermantel mit einem Durchmesser von  $125 \mu\text{m}$ . Je nach Faserlänge und geometrischem Faserverlauf (Wickelradius) können signifikante Anteile des in den Fasermantel eingekoppelten Lichtes bis zum Faserende geführt werden und dort austreten. Die kohärente Überlagerung mit dem aus dem Faserkern austretenden Licht erzeugt einen Lichtstrahl mit verspeckelter, gaußscher Intensitätsverteilung und kreisförmigem Querschnitt. Grundsätzlich ist eine Rauheitscharakterisierung möglich, wenn das Messobjekt mit einem Specklemuster beleuchtet wird [4]. Im Fall spiegelnd glatter Oberflächen detektiert der Sensor das gespiegelte Beleuchtungsspecklemuster. Der Auswertalgorithmus liefert daher größere Ropt-Werte als im Fall eines homogenen bzw. gaußförmigen Beleuchtungsstrahls. Der maximale Ropt-Wert für raue Oberflächen an bzw. oberhalb der oberen Messbereichsgrenze bleibt dagegen unverändert. Er ist durch den physikalisch definierten Speckledurchmesser eines vollständig ausgeprägten Specklemusters festgelegt [5]. Um die unerwünschte Specklebildung im Beleuchtungsstrahl zu verhindern wird ein Lichtwellenleiter mit einer Mindestlänge von 5 m mit einem Krümmungsradius von etwa 0,06 m aufgewickelt. Diese





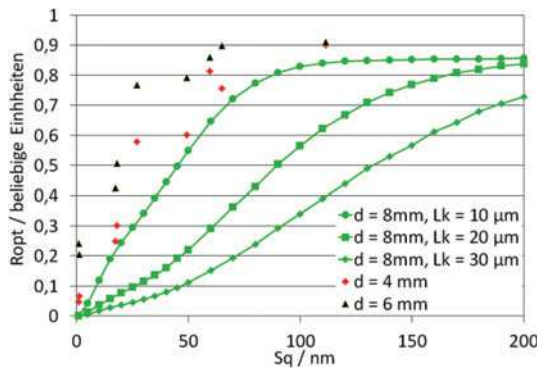
**Abbildung 2:** Anhand von drei Werten (schwarze Punkt-Markierungen) der zweidimensionalen AKF einer Speckle-Intensitätsverteilung lassen sich richtungsbezogene, optische Rauheitsparameter  $Ropt_x$  und  $Ropt_y$  bestimmen. Hier dargestellt für die gemessenen Streulichtbilder polierter Oberflächen mit a)  $Sa = 12,5$  nm (vgl. Abbildung 1c) und b)  $Sa = 50$  nm (vgl. Abbildung 1d).

Faserbiegung führt dazu, dass das im Fasermantel geführte Licht auf dem Weg bis zum Faserende durch seitliche Streuung aus der Faser heraus nahezu vollständig reduziert wird. Am Faserende tritt nahezu ausschließlich vom Faserkern geführtes Licht mit kreisrundem Querschnitt und gaußförmigem Intensitätsprofil aus. Die Faser bildet somit ein optisches Raumfilter. Eine Linse kollimiert das austretende Licht zu einem parallelen Lichtstrahl mit definiertem Durchmesser, der je nach Anwendung zwischen 1 mm und 10 mm beträgt. Der an der Strahlteilerkeilplatte mit dem Teilungsverhältnis 50 : 50 reflektierte Strahl beleuchtet das Messobjekt senkrecht. Der vom Strahlteiler transmittierte Laserstrahl wird in einer Strahlenfalle absorbiert, sodass kein störendes Streulicht entsteht. Aufgrund des Keilwinkels von  $0,5^\circ$  zwischen den Strahlteilerflächen werden der Vorder- und der deutlich schwächere Rückseitenreflex räumlich getrennt und beleuchten verschiedene Bereiche auf dem Messobjekt senkrecht bzw. unter einem Einfallswinkel von  $1^\circ$ . Die Messobjektoberfläche reflektiert bzw. streut das Licht. Der Anteil des senkrecht einfallenden Strahls gelangt durch die Strahlplatte zur digitalen Kamera ohne Objektiv. Der CMOS-Sensor mit den Abmessungen  $10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  erfasst die Fernfeld-Intensitätsverteilung des diffus reflektierten bzw. gestreuten Lichts in einem kleinen Bereich um die geometrische Reflexionsrichtung.

Abbildung 1b zeigt die mit einer Messanordnung gemäß Abbildung 1a aufgenommene, leicht diffus reflektierte Intensitätsverteilung einer spiegelnd glatten Oberfläche ( $Sq = 3$  nm). Sie entspricht nahezu dem Intensitätsprofil des einfallenden Laserstrahls und weist nur schwache Intensitätsmodulationen infolge destruktiver Interferenz nach der Wechselwirkung der elektromagne-

tischen Welle mit der Messobjektoberfläche auf. Mit zunehmender Oberflächenrauheit erhöht sich der Streulichtanteil. Dies führt zu stärkeren räumlichen Intensitätsmodulationen in der Beobachtungsebene. Es entstehen partiell ausgeprägte Specklemuster (Abbildung 1c–d). Die obere Messbereichsgrenze ist erreicht, wenn der Specklekontrast maximal und somit das Specklemuster vollständig ausgeprägt ist (Abbildung 1e). Eine weitere Rauheitszunahme hat keinen Einfluss mehr auf die statistischen Eigenschaften des Specklemusters (mittlerer Speckledurchmesser, Specklekontrast). Der Messeffekt besteht in rauheitsabhängigen, räumlichen Modulationen bzw. hochfrequenten, stochastischen Fluktuationen von Speckle-Intensitäten. Der mittlere Speckledurchmesser und der Specklekontrast sind quantifizierbare Maße, welche mit der Rauheit der Oberfläche korrelieren [6].

Die Herausforderung einer rauheitsbezogenen Bildauswertung besteht darin, die mittleren lateralen Abmessungen der stochastisch im Bild verteilten Speckles objektiv zu quantifizieren. Ein Ansatz beruht auf der Berechnung der zweidimensionalen Autokorrelationsfunktion (AKF) einer Streulichtintensitätsverteilung [4, 9]. Die Abbildungen 2a und b zeigen, dass die AKF-Flankensteigung in der Umgebung des AKF-Maximums mit der Rauheit signifikant zunimmt. Darüber hinaus weisen unterschiedliche AKF-Flankensteigungen in  $x$ - bzw.  $y$ -Richtung auf Vorzugsrichtungen der Oberflächenrauheit hin. Die unidirektional polierten Messobjektoberflächen sind in Bearbeitungsrichtung ( $y$ -Richtung) glatter als senkrecht dazu ( $x$ -Richtung). Im Hinblick auf die Angabe reproduzierbarer optischer Rauheitskennwerte werden die AKF-Flankensteigungen aus der Differenz des Maximalwertes der AKF und des benachbarten AKF-Wertes in  $x$ - bzw.



**Abbildung 3:** Rauheitskennwert  $R_{opt}$ , ermittelt anhand berechneter Streulichtbilder für Modelloberflächen mit drei verschiedenen lateralen Korrelationslängen  $L_k$  und den Beleuchtungsfleckdurchmesser 8 mm (durchgezogene Hilfslinien) sowie anhand gemessener Streulichtbilder feingeschliffener, polierter oder geläppter Oberflächen mit unbekanntem lateralen Korrelationslängen für die Beleuchtungsfleckdurchmesser 4 mm (gefüllte Rauten) und 6 mm (Dreiecke).

$y$ -Richtung berechnet [9]. Die Werte der richtungsbezogenen optischen Rauheitsparameter  $R_{opt_x}$  und  $R_{opt_y}$  liegen im offenen Wertebereich  $]0, 1[$ . Abbildung 3 zeigt, dass sich die  $R_{opt}$ - und  $Sq$ -Werte eindeutig einander zuordnen lassen. Nach einer Messung verschieden rauher Oberflächenrauhheitsnormale desselben Topografietyps, lässt sich an die ermittelten  $R_{opt}$ -Werte eine Kurve approximieren, welche den Zusammenhang zwischen den beiden Rauheitskenngrößen für beliebige Rauheitswerte innerhalb des Messbereiches des Streulichtmesssystems beschreibt.

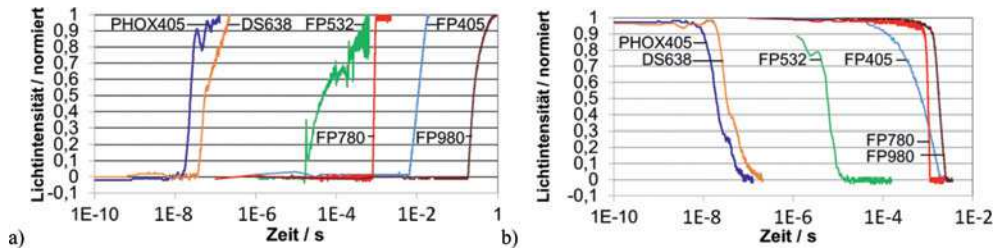
### 3 Messbereich und Auflösung

Laserstreulicht-Messverfahren liefern keine genormten Oberflächenkennwerte. Allerdings korrelieren die optisch ermittelten Rauheitskennwerte  $R_{opt_x}$  und  $R_{opt_y}$  im Fall stochastisch rauher Oberflächen mit normal verteilten Oberflächenhöhenwerten in einem definierten Messbereich mit den genormten Rauheitskenngrößen  $R_q$ ,  $R_a$ ,  $S_q$  und  $S_a$  (ISO 4287, ISO 25178). Da Streulicht-Messverfahren aufgrund der integralen Messdatenerfassung mit einer einzigen Bildaufnahme und der kurzen Messdatenerfassungszeit für den fertigungsnahen bzw. den In-Prozess-Einsatz prädestiniert sind, stellen sie eine sinnvolle Ergänzung zu Labor-Messverfahren dar. Bei der Auswahl und Zusammenstellung von Komponenten für ein Streulicht-Messsystem stellt sich die Frage, welche Messprozess-Parameter den Messbereich, die Auflösung und die Messunsicherheit in welchem Maße beeinflussen. Im Fall der angestrebten Charakterisierung schnell bewegter, optisch

glatter Oberflächen beeinflussen die Laserwellenlänge, der Beleuchtungsfleck-Durchmesser und die Modulierbarkeit des Laserstrahls bzw. der zeitliche Intensitätsverlauf der Lichtpulse den Messbereich und die Auflösung. Die entsprechenden Parameterwerte und deren Unsicherheiten können messtechnisch ermittelt werden oder liegen in Form von Herstellerangaben vor. Darüber hinaus tragen statistische Parameter wie z. B. die laterale Korrelationslänge der Messobjektmikrotopografie, das Pixelrauschen der Digitalkamera und das Laserschrotrauschen zur Messunsicherheit des Rauheitsmessergebnisses bei. Da die Werte dieser Parameter nicht direkt zugänglich sind, unterliegt deren Quantifizierung statistischen Abschätzungen, Vereinbarungen oder Annahmen.

Abbildung 3 zeigt als Ergebnis einer Simulation des Streulicht-Messprozesses den Zusammenhang zwischen dem optischen Rauheitskennwert  $R_{opt}$  und dem genormten, flächenbezogenen quadratischen Mittenrauwert  $S_q$  für drei verschiedene laterale Oberflächenkorrelationslängen  $L_k$  und für die Lichtwellenlänge  $\lambda = 532$  nm. Die Kenngröße  $L_k$  quantifiziert die mittlere laterale Abmessung von Kuppen und Tälern einer Topografie. Die drei Kurven streben asymptotisch gegen denselben Maximalwert  $R_{opt} \approx 0,85$ , wobei die Kurvensteigung für geringere  $L_k$ -Werte zunimmt. Der Messbereich des Streulichtmesssystems lässt sich als der  $S_q$ -Wertebereich definieren, für den sich unterscheidbare  $R_{opt}$ -Werte ergeben. Dabei ist die Auflösung des Messverfahrens innerhalb des jeweiligen Messbereiches dort am höchsten, wo der Kurvenverlauf die größte Steigung aufweist. Die Messergebnisse zeigen, dass sich im Messbereichsabschnitt mit der höchsten Auflösung Rauheitsunterschiede von  $\Delta S_q < 1$  nm differenzieren lassen (vgl. Abschnitt 5). Der Messbereich nimmt für geringere  $L_k$ -Werte ab, während die Auflösung zunimmt. Zu beachten ist, dass im Fall von Oberflächen mit ortsabhängig unterschiedlichen lateralen Korrelationslängen die Streuung der optischen Rauheitsmesswerte und damit auch die Messunsicherheit zunehmen.

Im Hinblick auf die angestrebte großflächige Oberflächen-Charakterisierung erfolgten Streulichtmessungen mit den Beleuchtungsfleckdurchmessern 4 mm und 6 mm und der Lichtwellenlänge 532 nm an Oberflächen, welche mit verschiedenen Verfahren (feinschleifen, polieren, läppen) gefertigt wurden (Abbildung 3, gefüllte Rauten und Dreiecke). Der im Vergleich zu den berechneten Kurven steile Anstieg der  $R_{opt}$ -Werte legt laterale Korrelationslängen  $L_k < 10$  µm nahe. Die Abweichungen der gemessenen  $R_{opt}$ -Werte von einer idealen Kurve sind systematischer Natur und auf die unterschiedlichen Topografietypen mit jeweils unterschiedlichen Korrelationslängen zurückzuführen. Die verschiedenen steilen Anstiege



**Abbildung 4:**  
Sprungantworten der  
Ausgangsleistung  
verschiedener Laser  
a) Einschalten und  
b) Ausschalten im  
Modulationsbetrieb.

der Messwerte beider Messreihen resultieren aus dem unterschiedlichen Leuchtfleckdurchmesser, welcher umgekehrt proportional zum mittleren Speckledurchmesser ist. Ein größerer Leuchtfleck führt bei gleicher Rauheit zu kleineren Speckles und somit zu steileren Flanken des AKF-Verlaufes. In Abbildung 3 wird dies daran deutlich, dass die Ropt-Werte für den größeren Leuchtfleckdurchmesser (Dreiecke) bei gleicher Rauheit jeweils größer als diejenigen für den kleineren Leuchtfleckdurchmesser (Rauten) sind.

Der Verlauf der gemessenen Kurven in Abbildung 3 zeigt, dass für eine absolute Messung von  $S_q$  eine Kalibrierung des Streulichtmesssystems über dem gesamten Messbereich von  $1 \text{ nm} < S_q < 100 \text{ nm}$  Oberflächenrauhnormale mit Rauheitswerten z. B. im Abstand  $\Delta S_q \approx 10 \text{ nm}$  erforderlich sind. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit und hohen Auflösung des Streulichtmessverfahrens eignet es sich jedoch auch ohne Kalibrierung dazu, in kontinuierlichen Fertigungsprozessen Änderungen der Oberflächenrauheit bzw. Abweichungen von einem Rauheitssollwert zu detektieren.

Streulichtmessungen an bewegten Oberflächen mit Geschwindigkeiten bis zu  $300 \text{ m/min}$  erfordern Belichtungszeiten im Bereich weniger Mikrosekunden. Die kürzeste Belichtungszeit der eingesetzten Kamera beträgt  $25 \mu\text{s}$ . Kürzere Belichtungszeiten sind mit vertretbarem finanziellen Aufwand nur über entsprechend kurze Laserlichtpulse erreichbar. Abbildung 4 zeigt die Ein- bzw. Ausschalt-Sprungantworten der Lichtleistung von getesteten Halbleiterlasersystemen verschiedener Wellenlängen, Leistungs- und Preisklassen von  $100 \text{ €}$  bis  $14\,000 \text{ €}$ . Lediglich die hochpreisigen Laserdiodensysteme PHOX ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ) und DS ( $\lambda = 638 \text{ nm}$ ) erfüllen die Anforderungen mit Anstiegs- und Abfallzeiten im Sub-Mikrosekunden-Bereich. Alle anderen Laser reagieren im Hinblick auf die angestrebte Messrate von bis zu  $1 \text{ kHz}$  zu träge auf die Pulsweitenmodulation. Insbesondere bei den Laserdiodenmodulen FP405, FP780 und FP980 sind bereits die Ein- und Ausschaltverzögerungszeiten länger als  $1 \text{ ms}$ , sodass sich eine zeitlich höher aufgelöste Betrachtung der Anstiegs- und Abfallflanken erübrigt. Das grün emittierende Laserdiodenmodul FP532 stellt einen Grenzfall dar.

Die Ausgangsleistung ist sowohl in der Anstiegsflanke als auch im Dauerbetrieb sehr verrauscht. Die Ein- und Ausschaltverzögerung sind im Hinblick auf die angestrebte Messrate vertretbar. Ebenso ist der Kaufpreis dieses Laserdiodenmoduls von etwa  $500 \text{ €}$  im Hinblick auf die Gesamtkosten für ein industrietaugliches Sensormesssystem akzeptabel. Im vorliegenden Fall wird das Laserdiodenmodul FP532 über die Software vom FPGA gesteuert und mit der Kamera synchronisiert. Somit ist es möglich, innerhalb der Belichtungszeit der Kamera Lichtpulse der Dauer  $1 \mu\text{s}$  oder länger zu erzeugen. Die Lichtpulsdauer und die Laserleistung werden automatisch angepasst, um Über- und Unterbelichtungen zu vermeiden. Gleichzeitig ist der Bildauswertalgorithmus so ausgelegt, dass Änderungen der mittleren Streulichtintensität keinen Einfluss auf das Messergebnis haben, sofern keine Überlichtungen auftreten.

## 4 Hardwarelösung zur Beschleunigung der Bildauswertung

Für die Umsetzung der Auswertalgorithmen wurde eine vollständige Umsetzung aller Berechnungen auf dem FPGA angestrebt. Ziel war dabei eine Bildfrequenz von mindestens  $200 \text{ Bildern/s}$ . Im Vergleich zu den Digitalen Signalprozessoren (DSPs) erreichen Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) in vielen Anwendungen eine deutlich höhere Effizienz [7]. Dies trifft in besonderem Maße auch auf die Bildverarbeitung zu, z. B. in der Speckle-Interferometrie [8]. Weiterhin bieten FPGAs eine engere Einbindung der Kameraschnittstellen in die Berechnungspipeline, was mehr Möglichkeiten für die Auswahl von Hochgeschwindigkeitskameras zulässt. Mit Bildgrößen von bis zu  $2 \text{ Megapixeln}$  bei Bildraten von  $340 \text{ Bildern/s}$  wird eine Bandbreite von über  $6 \text{ Gbit/s}$  benötigt. Sowohl die CameraLink-Schnittstelle als auch die FPGA-Eingänge unterstützen diesen Durchsatz dauerhaft. Allerdings verbietet sich aufgrund der hohen Datenmengen und einer permanenten Verarbeitung ohne regel-

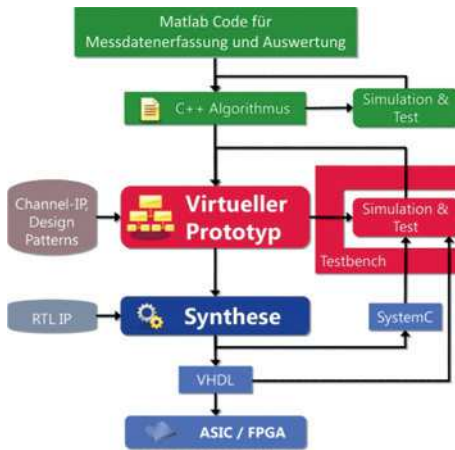


Abbildung 5: Datenfluss-Analyse und Partitionierung der Algorithmen.

mäßige Pausen eine Zwischenpufferung der Bilder. Alle Berechnungen, von der Bildaufnahme am Sensor bis zur Abspeicherung der Ergebnisdaten, müssen im Pixeltakt verarbeitet werden, so dass außer einer gewissen Latenz keine größer werdenden Puffer bereitgestellt werden müssen. Aus diesem Grund wurde von Beginn an eine Streaming-Architektur favorisiert, bei der nur kleine Puffer genutzt werden und alle Berechnungen auf Basis der Daten in der Umgebung des aktuellen Pixels ausgeführt werden.

Für eine effiziente und ausreichend schnelle Verarbeitung muss die Interaktion und Integration der einzelnen Komponenten optimiert werden. Datenfluss-Analyse und Partitionierung der Algorithmen sind daher zentrale Teile der Entwicklung (Abbildung 5). Der Gesamtalgorithmus wird in mehreren Schritten entwickelt und im Hinblick auf eine schnelle Bildauswertung mittels hochleistungsfähiger Hardware optimiert. Ausgehend von einer Beispielimplementierung des Verfahrens in Matlab-Code wurde eine portable C++-Anwendung entwickelt und für erste Vergleichstests genutzt. Diese Anwendung bildet gleichzeitig das Goldene Modell, gegen das alle weiteren Entwicklungen getestet werden. Um das Verhalten des Systems auf der späteren Hardware weiter zu evaluieren und die Synchronisation der Einzelkomponenten zu optimieren, wurde aus dem C++-Programm ein virtueller Prototyp. Mit der Simulationsbibliothek SystemC werden schrittweise Hardwareeigenschaften in C++ modelliert und in der Anwendung ergänzt. So werden die wichtigen Eigenschaften des Systems wie kontinuierlicher Datenfluss und hochgradige Parallelisierung exakt analysiert und gezielt umgesetzt [10].

Für das zu entwickelnde Messverfahren wird die Autokorrelationsfunktion über den Streulichtspecklebildern

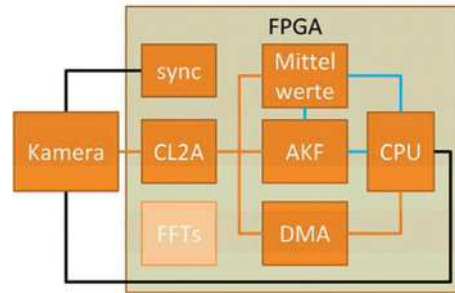


Abbildung 6: Alle Komponenten der FPGA-Implementierung.

berechnet. Für die Berechnung der Opt-Werte hat sich die direkte Berechnung der AKF-Werte als vorteilhaft erwiesen [9]. Sie ist hervorragend für eine Streaming-Verarbeitung der Daten geeignet, da die Multiplikation der Pixelwerte in einer eng begrenzten Nachbarschaft stattfindet. Mit jedem neuen Pixel wird auch ein Ergebnispixel ausgegeben und so die Echtzeitverarbeitung sichergestellt. Die parallele Multiplikation mehrerer Pixel ist durch mehrere parallele Verarbeitungseinheiten auf dem FPGA realisierbar.

Abbildung 6 zeigt die im FPGA umgesetzten IP-Cores, die zusammen mit CPU, Kamera und dem nicht eingezeichneten Laser das bildverarbeitende System bilden. Der Datenfluss der Bilddaten, dargestellt durch die orangefarbenen Verbindungen, streamt die Bilder von der Kamera durch den CameraLink-IP-Core in die Berechnungseinheiten. Hier werden Mittelwerte der Helligkeitsinformation und die AKF berechnet. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Bilddaten zur Anzeige bzw. zum Abspeichern an die CPU zu senden, wofür der DMA-Core genutzt wird. Die Messergebnisse, Mittelwerte und AKF, werden von der CPU über die blauen Kanäle ausgelesen und gespeichert. Zudem werden die Mittelwerte auch von der AKF zur Berechnung genutzt. Schließlich gibt es noch Kontroll- und Konfigurationskanäle (schwarz), die die Kamera und die Synchronisation mit dem Laser konfigurieren. Der Sync-IP-Core realisiert die Lasersynchronisation mit der Belichtung des Kamerasensors. So können auch extrem kurze Belichtungszeiten für schnell bewegte Objekte realisiert werden. Der FFT-Core wird als Vergleichsberechnung in das System integriert, befindet sich allerdings noch in Entwicklung.

Neben der Algorithmenimplementierung wurde auch eine Platine für das Messsystem entwickelt, die die erforderlichen Schnittstellen aufweist und robust genug für die Integration in die Produktionssysteme ist. Entstanden ist dabei das im folgenden Abschnitt vorgestellte Demonstratormesssystem. Zusammen mit dem ZYNQ-FPGA-Modul der Firma Enclustra steht damit ein kompaktes, stabiles



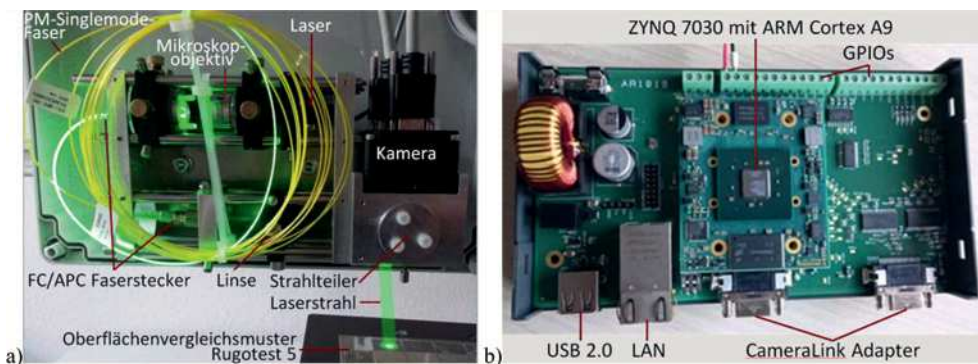
Hochgeschwindigkeits-BV-System für industrielle Zwecke zur Verfügung. Dieses wird in Zukunft in die Anwendungsszenarien integriert und kalibriert.

## 5 Demonstratormesssystem und Messergebnisse

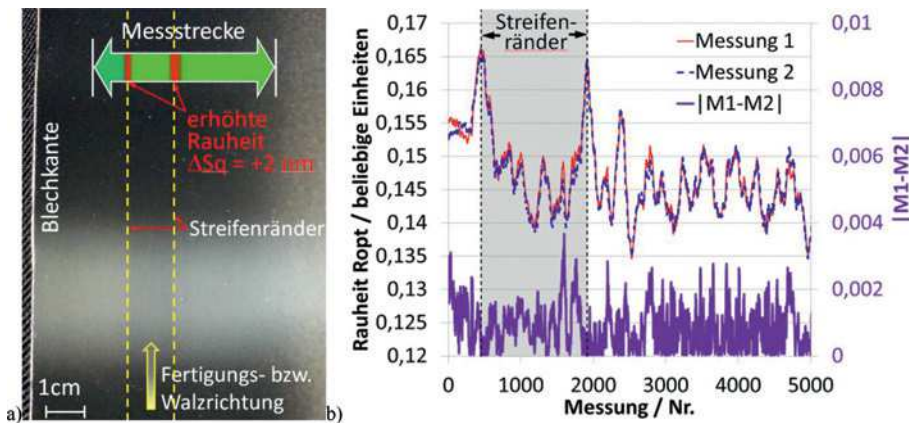
Die beschriebenen Untersuchungen erfolgten unter Laborbedingungen mit einem experimentellen optischen Messaufbau und einem FPGA Entwicklerboard. Das Ziel bestand darin, geeignete Hardwarekomponenten für die Messaufgabe zu identifizieren und die erforderlichen Softwarealgorithmen in die Programmiersprache VHDL zu übertragen und zu testen. Der Laser und die Kamera wurden zudem im Hinblick auf die langfristig geplante Weiterentwicklung zu einem kostengünstigen, industrietauglichen Sensormesssystem ausgewählt. Zunächst wurden die Messsystemkomponenten jedoch in einem modularen Demonstratormesssystem zusammengeführt, das bereits für den versuchsweisen Einsatz im Produktionsumfeld geeignet ist. Abbildung 7a zeigt den kompakten optischen Messkopf in der Draufsicht analog zur schematischen Darstellung in Abbildung 1a. Der aufgewickelte Lichtwellenleiter leuchtet auf der Einkoppelseite hell. Dabei handelt es sich um Streulicht aus dem Fasermantel. Aufgrund des starken Biegeradius von etwa 0,06 m der 5 Meter langen Faser wird das im Fasermantel geführte Licht im Faserverlauf nahezu vollständig seitlich aus der Faser gestreut. Die Intensität des am Faserende aus dem Fasermantel austretenden Lichtes ist vernachlässigbar. Das aus dem Faserkern austretende Licht wird zu einem Lichtstrahl mit einem Durchmesser von 10 mm und gaußscher Intensitätsverteilung kollimiert, über eine Strahlteilerkeilplatte um 90° umgelenkt und beleuchtet das Messobjekt senkrecht.

Die CMOS-Kamera erfasst die vom Messobjekt diffus reflektierte Streulichtverteilung. Die Bilddaten werden über eine CameraLink-Schnittstelle zur modularen FPGA basierten Steuer- und Auswerteeinheit übertragen (Abbildung 7b). Die Kamera liefert bis zu 333 Vollbilder pro Sekunde mit 2 Megapixeln und einem Dynamikbereich von 8 Bit. Über die Steuersoftware der Kamera lässt sich der Bildbereich auf sogenannte Regions of Interest (ROI) begrenzen. Dadurch ist es möglich, Streulichtbilder kleinerer Oberflächenbereiche von beispielsweise 1,25 mm × 1,25 mm mit einer Bildrate von 2664 Hz zu erfassen, zur modularen Steuer- und Auswerteeinheit zu übertragen und in Echtzeit auszuwerten. Die Abmessungen dieser Fläche entsprechen fünf Grenzwellenlängen (Cutoff), die gemäß DIN EN ISO 4288 für die Rauheitsbewertung von Oberflächen mit aperiodischen Profilen und einem arithmetischen Mittenrauwert  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  erforderlich sind.

Abbildung 8a zeigt einen etwa 8 cm × 11 cm großen Oberflächenbereich eines gewalzten Feinbleches mit einem in Walzrichtung (im Bild senkrecht) verlaufenden, etwa 1 cm breiten Bereich (zwischen den gelben Markierungen), in welchem einfallendes Licht unter bestimmten Betrachtungswinkeln subjektiv erkennbar anders gestreut wird als von der restlichen Oberfläche. Referenzmessungen mit einem Weißlichtinterferometer ergaben Rauheitswerte von  $S_q = 22 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$  an den Bereichsrändern und  $S_q = 20 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$  innerhalb sowie rechts vom streifenförmigen Bereich. Mit dem Streulicht-Demonstratormesssystem wurde das Blech entlang der im Bild gekennzeichneten Messstrecke mit einem Leuchtfleckdurchmesser von 10 mm gescannt. Dabei wurden 5000 Messungen mit stark überlappenden Gesichtsfeldern durchgeführt. Abbildung 8b stellt die resultierenden Rauheitswerte  $R_{opt}$  für zwei aufeinander folgende Messreihen unter Wiederholbedingungen dar. Die blaue und rote Linie sind nahezu deckungsgleich. Die untere Linie zeigt den



**Abbildung 7:** Das modulare Demonstratormesssystem besteht aus a) dem Messkopf mit faseroptischem Raumfilter und b) der FPGA basierten Messdatenerfassung-, Steuer- und Auswerteeinheit.



**Abbildung 8:** Erste Streulichtmessung erfolgte a) an einem gewalzten Feinblech (Draufsicht) mit einem in Walzrichtung verlaufenden, etwa 10 mm breiten Streifen, welcher eine vom Rest der Oberfläche subjektiv erkennbar abweichende Lichtstreuung aufweist. Die mit einem Referenzmessgerät ermittelten Rauheitswerte betragen  $Sq = 22 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$  an den Streifenrändern sowie  $Sq = 20 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$  innerhalb und rechts des Streifens. b) Zwei unter Wiederholbedingungen durchgeführte Streulichtmessreihen mit jeweils 5000 Einzelmessungen entlang der gekennzeichneten Messstrecke und mit einem Leuchtfleckdurchmesser von 10 mm zeigen signifikant erhöhte Ropt-Werte an den Streifenrändern sowie eine gute Reproduzierbarkeit (obere Kurven, linke Ordinate) bzw. eine vernachlässigbare Differenz der beiden Kurvenverläufe (untere Kurve, rechte Ordinate).

Betrag der Differenz der beiden oberen Kurven, welche an jedem Messort weniger als 2% des Ropt-Wertes beträgt. Dies zeigt die gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei wiederholten Messungen am selben Messort nach einer Repositionierung des Messsystems. Darüber hinaus wird die hohe Empfindlichkeit des integralen Rauheitsparameters Ropt gegenüber kontinuierlichen Rauheitsänderungen im Gesichtsfeld deutlich, wenn sich der Oberflächenbereich mit erhöhter Rauheit im Verlauf der Messreihe vollständig durch den Beleuchtungsfleck bewegt. Die hohe Auflösung des Messsystems drückt sich darin aus, dass der Ropt-Wert innerhalb der rauerer Oberflächenbereiche gegenüber dem Ropt-Wert der glatteren, umliegenden Oberfläche um nahezu 14% größer ist. Dies entspricht bei den gewählten Parametereinstellungen einer Rauheitsdifferenz von  $\Delta Sq = 2 \text{ nm}$ . Somit ist das Messsystem dafür geeignet, in der laufenden Feinblechfertigung schleichende Änderungen der Oberflächenrauheit frühzeitig zu erkennen und zu quantifizieren. Die Messergebnisse liegen zwischen den in Abbildung 3 dargestellten Kurvenverläufen simulierter Streulichtmessungen an Modelloberflächen mit verschiedenen lateralen Oberflächenkorrelationslängen. Die rein qualitative Übereinstimmung von Simulation und Messung ist auf vereinfachende bzw. verallgemeinernde Annahmen (z. B. bezüglich der Oberflächenhöhenverteilung, der Oberflächenkorrelationslänge und des Laserstrahlintensitätsprofils) im Zuge der Simulation zurückzuführen. Aktuelle, unveröffentlichte Arbeiten befassen mit der Berechnung von Streulichtverteilungen gemessener Oberflächen und der Berücksich-

tigung weiterer Einflussfaktoren (z. B. Rauschen, Umgebungslicht), um eine quantitative Übereinstimmung von Simulation und Messung zu erreichen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Integral messende Streulicht-Messverfahren eignen sich aufgrund kurzer Messdaten-Erfassungszeiten und variabler Beleuchtungsfleckdurchmesser für fertigungsnahe Rauheitsmessungen an bewegten Oberflächen mit Relativgeschwindigkeiten von mehreren hundert Metern pro Minute. Das beschriebene Laserstreulichtmesssystem mit einer Messrate im Kilohertzbereich ist für Rauheitsmessungen im Produktionsumfeld ausgelegt, um spiegelnde Oberflächen drehender Arbeitswalzen oder von Feinblechen im Bearbeitungsprozess mit mehreren Quadratmetern pro Minute vollständig zu charakterisieren. An den geplanten Einsatzorten ist es damit erstmals möglich, überhaupt Rauheitsmessungen durchzuführen und darüber hinaus eine hohe Oberflächenabdeckung zu erreichen. Die Messrate hängt von der Bildrate der Kamera, der Datenrate der Schnittstelle für die Bildübertragung, den Abmessungen des mit einer Einzelmessung erfassten Oberflächenbereiches, der Komplexität der Bildauswertelgorithmen und der Leistungsfähigkeit der FPGA Hardware ab. Die Messrate des vorgestellten Rauheitsmesssystems beträgt 333 Hz bei einem Gesichtsfeld von  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  bzw. 1332 Hz bei einem Gesichtsfeld von  $20 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$ . Das Gesichtsfeld ist die kleinere

Fläche, die entweder durch den Laserleuchtfleckdurchmesser oder die Anzahl ausgewerteter Zeilen des CMOS-Kamerasensors (2048 Pixels  $\times$  1024 Pixels, Abmessungen 20 mm  $\times$  10 mm), welche durch eine sogenannte „Region of Interest“ (ROI) festgelegt werden kann, definiert ist. Bei dem maximalen Gesichtsfeld von 20 mm  $\times$  10 mm und der Messrate 333 Hz ist bis zu einer Oberflächenbewegungsgeschwindigkeit von 400 m/min die vollständige Abdeckung eines in Vorschubrichtung unbegrenzten Oberflächenbereiches der Breite 10 mm möglich. Bei einer Messrate von 1332 Hz beträgt die maximal zulässige Oberflächenbewegungsgeschwindigkeit 1600 m/min, um einen entsprechenden Oberflächenbereich mit der Breite 2,5 mm lückenlos zu erfassen. In beiden Fällen wird eine Fläche von nahezu 4 m<sup>2</sup>/min charakterisiert. Um bei diesen Geschwindigkeiten auswertbare, „scharfe“ Specklebilder zu erzeugen, sind Belichtungszeiten des Kamerasensors im einstelligen Mikrosekundenbereich erforderlich. Derartig kurze Belichtungszeiten lassen sich mit der hier eingesetzten Kamera nicht erreichen. Daher werden mit einem Laserdiodensystem, das eine Intensitätsmodulation im MHz-Bereich erlaubt, kurze Lichtpulse erzeugt und so mit dem Bildtakt der Kamera synchronisiert, dass die Dauer des Überlapps von Lichtpuls und Kamera-belichtungszeit im Mikrosekundenbereich einstellbar ist. Die rauheitsbezogene Echtzeit-Auswertung der digitalen Streulichtbilder erfolgt mittels Korrelationsverfahren. Die erforderlichen Algorithmen wurden auf das hierfür Wesentliche reduziert und speziell für die Implementierung auf einem leistungsfähigen FPGA angepasst. Erste Streulichtmessreihen mit dem Demonstratormesssystem an einem Feinblech, welches einen fehlerhaften Oberflächenbereich mit einer um  $\Delta S_q = 2$  nm erhöhten Rauheit aufweist, bestätigen die hohe Auflösung im Subnanometerbereich und die gute Reproduzierbarkeit sowie die geringe statistische Streuung der Rauheitsmessergebnisse, welche unter Wiederholbedingungen Abweichungen von weniger als 2% aufweisen. Der unmittelbar bevorstehende In-Prozess-Einsatz in einer Abrichtanlage für Arbeitswalzen mit spiegelnden Oberflächen soll über das Langzeitverhalten der Messsystemkomponenten und den Einfluss des Fertigungsumfeldes auf den Messprozess Aufschluss geben.

**Danksagung:** Das Projekt „OptOChar – Optische Oberflächen-Charakterisierung im Fertigungsprozess mittels leistungsfähiger Hardware“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „Photonik Forschung Deutschland“ unter dem Förderkennzeichen 13N13535 gefördert. Der Projektverbund besteht aus den Partnern CoSynth GmbH & Co. KG aus Oldenburg, FRT GmbH aus Bergisch Gladbach, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) der Universität Bremen und Tata Steel Plating Hille & Müller GmbH aus Düsseldorf als assoziiertem Anwendungspartner

## Literatur

1. P. Lehmann, G. Goch. Comparison of Conventional Light Scattering and Speckle Techniques Concerning an In-Process Characterization of Engineered Surfaces. *Annals of the CIRP*, 49/1, 2000, 419–422.
2. P. Beckmann, A. Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon Press, Oxford, 1963.
3. J. A. Ogilvy. *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces*, Hilger, Bristol, 1991.
4. P. Lehmann. Surface-Roughness Measurement Based on the Intensity Correlation Function of Scattered Light under Speckle-Pattern Illumination. *Applied Optics*, 38, 7, 1999, 1144–1152.
5. J. C. Dainty, A. E. Ennos, M. Francon, J. W. Goodman, T. S. McKechnie, G. Parry. *Laser Speckle and Related Phenomena*, Springer Verlag, Berlin, 1975.
6. S. Patzelt, H. Prekel, F. Horn, A. Tausendfreund, G. Goch. Bildverarbeitung und Simulation in der statistisch optischen Oberflächenmesstechnik. *Technisches Messen*, 75, 10, 2008, 537–546.
7. P. Köchert, J. Flügge, R. Köning, C. Weichert, E. Manske. Ultra-präzise Lageregelung mittels interferometrischer Positionsdetektion und Tauchspulenantrieb. *Technisches Messen*, 81, 6, 2014, 316–323.
8. A. Meixner, T. Zeh, M. Riemenschneider, A. Purde, A. W. Koch. Formvermessung an bewegten technischen Oberflächen mittels der Speckle-Interferometrie. *Technisches Messen*, 70, 2, 2003, 93–98.
9. S. Patzelt, Ch. Stehno, A. Tausendfreund, G. Ströbel. Optimierter specklebasierter Rauheitsmessprozess für bewegte, spiegelnde Oberflächen. *Technisches Messen*, 83, 9, 2016, 484–493.
10. C. Stehno. Object Oriented HW/SW System Design with SystemC and OSSS, Embedded world conference proceedings, ISBN 978-3-7723-1012-6, 2010.

## Autoreninformationen

### **Dr.-Ing. Stefan Patzelt**

Universität Bremen, Bremer Institut für  
Messtechnik, Automatisierung und  
Qualitätswissenschaft (BIMAQ),  
Linzer Str. 13, D-28359 Bremen  
[pa@bimaq.de](mailto:pa@bimaq.de)

Stefan Patzelt studierte Physik an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und promovierte am Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen. Er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Arbeitsgruppe „In-Prozess Messtechnik und Optik“. Sein Forschungsinteresse auf dem Gebiet der geometrischen Messtechnik gilt innovativen optischen Messverfahren für den Einsatz im Produktionsumfeld.

### **Christian Stehno, GGF**

CoSynth GmbH & Co. KG, Marie-Curie-Str. 1,  
D-26129 Oldenburg  
[stehno@cosynth.com](mailto:stehno@cosynth.com)

Christian Stehno hat Informatik an der Universität Oldenburg studiert und dort 2000 das Diplom bekommen. Im Anschluss hat er in unterschiedlichen Bereichen der Informatik gearbeitet. Zu Beginn als Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Oldenburg in der Theoretischen Informatik, Lehrstuhl für Parallele Systeme. Anschließend wechselte er ans OFFIS Institut für Informationstechnologie und beschäftigte sich mit Entwurfsmethodik für Eingebettete Systeme. 2010 gründete er mit zwei Kollegen vom Institut die Firma CoSynth, die Eingebettete Systeme und intelligente Kameras für die Industrieautomation entwickelt. Dort ist er primär für die Bildverarbeitung und die Hardwarenahe Softwareentwicklung zuständig.

### **Dipl.-Phys. Dirk Stöbener**

Universität Bremen, Bremer Institut für  
Messtechnik, Automatisierung und  
Qualitätswissenschaft (BIMAQ),  
Linzer Str. 13, D-28359 Bremen  
[d.stoebener@bimaq.de](mailto:d.stoebener@bimaq.de)

Dirk Stöbener absolvierte ein Physik-Studium an der Universität Bremen und ist dort auch im Fachbereich Produktionstechnik als Leiter der Arbeitsgruppe „In-prozess Messtechnik und Optik“ am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) tätig. Seine Forschungsinteressen umfassen fertigungsnahe Messverfahren z. B. zur Positionsbestimmung und zur Charakterisierung von (geometrischen) Werkstückeigenschaften.

### **Dr.-Ing. Gerald Ströbel**

Universität Bremen, Bremer Institut für  
Messtechnik, Automatisierung und  
Qualitätswissenschaft (BIMAQ),  
Linzer Str. 13, D-28359 Bremen  
[str@bimaq.de](mailto:str@bimaq.de)

Gerald Ströbel ist Oberingenieur am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ). Neben der Automatisierungstechnik gilt sein Forschungsinteresse der optischen In-Prozess-Messtechnik. Er leitet die Forschungsarbeiten des BIMAQ innerhalb des Verbundprojekts „Optische Oberflächen-Charakterisierung im Fertigungsprozess mittels leistungsfähiger Hardware (OptOChar)“ (BMBF, Förderkennzeichen 13N13535).

### **Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer**

Universität Bremen, Bremer Institut für  
Messtechnik, Automatisierung und  
Qualitätswissenschaft (BIMAQ),  
Linzer Str. 13, D-28359 Bremen  
[andreas.fischer@bimaq.de](mailto:andreas.fischer@bimaq.de)

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer übernahm am 1. August 2016 die Leitung des Bremer Instituts für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ) am Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen. Nach dem Studium der Elektrotechnik und der daran anschließenden Promotion, für die er u. a. 2010 mit dem Messtechnik-Preis der AHMT e. V. ausgezeichnet wurde, habilitierte er sich auf dem Gebiet der Messtechnik am Institut für Mess- und Sensorsystemtechnik der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Dresden. Zu seinen Forschungsinteressen zählen laseroptische Messsysteme für hochdynamische Strömungs-, Fertigungs- und Materialprüfungsprozesse sowie messsystemtheoretische Ansätze zur Beschreibung von Messbarkeitsgrenzen.