

Tausendfreund, Andreas ; Stöbener, Dirk ; Fischer, Andreas

## Messung thermomechanischer Beanspruchungen in laufenden Schleifprozessen

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

DOI of this document\* (secondary publication): <https://doi.org/10.26092/elib/3326>

Publication date of this document: 20/09/2024

\* for better findability or for reliable citation

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

Tausendfreund, A., Stöbener, D. & Fischer, A. (2020). Messung thermomechanischer Beanspruchungen in laufenden Schleifprozessen. *tm - Technisches Messen*, 87(3), 201-209.  
<https://doi.org/10.1515/teme-2019-0133>

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 10.12.2019 veröffentlichten Artikels, verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0133>. 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.

Andreas Tausendfreund\*, Dirk Stöbener und Andreas Fischer

# Messung thermomechanischer Beanspruchungen in laufenden Schleifprozessen

Measurement of thermomechanical loads in running grinding processes

**Zusammenfassung:** Die Kenntnis der zum Beispiel während des Schleifprozesses auftretenden thermomechanischen Werkstückbeanspruchungen und der im Material verbleibenden Veränderungen lässt sich gemäß dem Konzept der Prozesssignaturen nutzen, um den Fertigungsprozess zu optimieren und mit anderen zu vergleichen (z. B. mit der Laserbearbeitung). Voraussetzung für die Erstellung einer Prozesssignatur ist, dass die Beanspruchungen während des laufenden Prozesses charakterisiert werden können. Aufgrund der rauen Prozessbedingungen gibt es beim Schleifen bisher keine prozessbegleitende Technik zur Messung der thermomechanischen Beanspruchungen in Form von Verschiebungen und Dehnungen in der bearbeiteten Randzone. Aus diesem Grund wird die Eignung der Speckle-Fotografie für prozessbegleitende Messungen von Werkstückbeanspruchungen in einem laufenden Schleifprozess ohne Kühlschmierstoff nachgewiesen und ein Konzept für eine Messung unter dem Einsatz von Kühlschmierstoffen vorgestellt.

**Schlagwörter:** In-Prozess-Messung, Speckle-Fotografie, Schleifprozess, Verformungs- und Dehnungsmessung.

**Abstract:** The knowledge of the thermomechanical workpiece loads occurring during the grinding process and of the modifications remaining in the material can be used according to the concept of process signatures, in order to optimize the manufacturing process and compare it with others (e. g. with laser processing). A prerequisite for the establishment of a process signature is that the loads can be characterized during the running process. Due to the rough process conditions, there is so far no process-accompanying technique for measuring thermomechanical

ical stresses in the form of deformations and strains in the machined edge zone during grinding. For this reason, the suitability of Speckle photography for process-accompanying measurements of workpiece loads in a running grinding process without cooling lubricant is proven and a concept for a measurement using cooling lubricants is presented.

**Keywords:** In-process measurement, speckle photography, grinding process, deformation and strain measurement.

## 1 Einleitung

In der Metallverarbeitung geht es darum, aus einem Grundmaterial ein Produkt mit funktionalen Eigenschaften zu erzeugen. Hierfür sind in der Regel verschiedene Fertigungsprozesse erforderlich, um die Form, die Oberflächenrauheit bzw. die Randzoneneigenschaft des Werkstücks gezielt einzustellen. Eine Prozesskette wie z. B. das Fräsen mit anschließenden Schleifen und Laserhärten lässt sich unter Umständen kostengünstiger gestalten, indem nach dem Fräsprozess ein Schleifprozess mit kombiniertem Schleifverfestigen erfolgt. Aktuelle Forschungsanstrengungen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TRR 136 zielen deshalb darauf ab, Fertigungsschritte prozessunabhängig über die sogenannte Prozesssignatur zu beschreiben [1, 2]. Die Grundvoraussetzung dafür ist jedoch eine In-Prozess-Charakterisierung der thermomechanischen Beanspruchungen des Werkstoffs in Form von Verformungen und Dehnungen.

Besonders geeignet für die berührungslose Messung von Verschiebungsfeldern sind laser-optische Speckle-Messverfahren. Die Elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI) ist ein etabliertes Verfahren, mit welchem sich out-of-plane Bewegungen in Richtung der optischen Achse aber auch dreidimensionale Verformungsfelder messen lassen [3]. Nachteil der ESPI ist, dass bis zu drei Lichtpfade mit einer Referenzwelle überlagert werden müssen [4]. Insbesondere im beschränkten Bauraum von Werkzeug-

---

\*Korrespondenzautor: Andreas Tausendfreund, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Str. 13, D 28359 Bremen, Germany, E-Mail: a.tausendfreund@bimaq.de

Dirk Stöbener, Andreas Fischer, Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Str. 13, D 28359 Bremen, Germany, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-2106> (D. Stöbener)

maschinen und dem rauen In-Prozess-Einsatz mit starken Vibrationen und Kontaminationen stößt dieses Verfahren jedoch an seine Grenzen. Prädestiniert ist hier das sehr viel einfachere und robustere Verfahren der Speckle-Fotografie [5, 6]. Bei diesen Verfahren wird die zu messende Oberfläche mit einem Laser beleuchtet und die Auswertebereiche in den mit der Kamera aufgenommenen Speckle-Bildern – jeweils vor und während des Auftretens der Verformung – miteinander korreliert. Aus den korrelierten Bildausschnitten lassen sich lokal laterale Ortsverschiebungen und somit ein zweikomponentiges 2D-Verschiebungsfeld bestimmen, wobei die untere Schranke für die theoretisch erreichbare Verschiebungsmessunsicherheit aus der Heisenbergschen Unschärferelation folgt. Mit aktueller Kamera- und Lasertechnologie können demnach Verschiebungsmessunsicherheiten von weniger als 7 nm erreicht werden [7]. Als berührungsloses optisches Messverfahren ist die Speckle-Fotografie daher prädestiniert für schnelle und präzise In-Prozess-Messungen. Die Speckle-Fotografie konnte kürzlich für Verformungsmessungen im Walz- [8] und Fräsprozess [9] eingesetzt werden. Aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen mit starkem Funkenflug oder dem Einsatz von Kühlschmierstoffen ist die Speckle-Fotografie beim Schleifprozess unter realen Bedingungen jedoch noch nicht zur Anwendung gekommen.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich deshalb mit speckle-fotografischen In-Prozess-Dehnungsmessungen beim Schleifen. Die sich hierbei ergebenden wissenschaftlichen Fragestellungen sind, ob trotz der anspruchsvollen Prozessbedingungen mit Partikel- und Funkenflug Speckle-Fotografie-Messungen prinzipiell möglich sind, wie eine robuste Bildauswertung erzielt wird und welche Messabweichungen sich durch den Einsatz von Kühlschmierstoffen ergeben.

Zur Erörterung dieser Fragestellungen wird im Kapitel 2 zunächst auf das grundlegende Prinzip der Verschiebungs- und Dehnungsmessungen mittels Speckle-Fotografie eingegangen, bevor im Kapitel 3 der experimentelle Aufbau und dessen Integration in die Bearbeitungsmaschine vorgestellt werden. Kapitel 4 befasst sich mit den zufälligen Messunsicherheiten des Messsystems. Die Ergebnisse der In-Prozess-Messung für den Flachsleifprozess ohne Kühlschmierstoff werden in Kapitel 5 diskutiert. Wie der Aufbau zu erweitern ist, um unter dem Einsatz von Kühlschmierstoff messen zu können, wird in Kapitel 6 gezeigt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 7.

## 2 Verschiebungs- und Dehnungsmessungen mittels Speckle-Fotografie

Die Speckle-Fotografie ist eine bekannte Technik zur Charakterisierung von Verschiebungsfeldern in der Ebene einer zu messenden Oberfläche [5, 6]. Eine Kamera erfasst hierbei das an der Oberfläche diffus gestreute kohärente Laserlicht. Die von der Oberfläche modulierten Phasenelemente der Lichtwelle erzeugen ein Bild der Topographie in der Bildebene (auf dem Kamerachip), welches aufgrund von konstruktiver und destruktiver Interferenz mit einem Pünktchen- bzw. dem Speckle-Muster überlagert ist (Abbildung 1). Die Größe der Speckle kann durch die Öffnung der Objektivblende in einem weiten Bereich variiert werden. Ein herausragendes Merkmal der subjektiven Speckle ist, dass sie – entsprechend dem Abbildungssystem – spezifischen Oberflächenpunkten zugeordnet werden können. Daher lassen sich Verschiebungen einzelner Speckle als Verschiebungen lokaler Oberflächenpunkte in der Objektebene interpretieren. Zur Berechnung des Verschiebungsfelds der gemessenen Oberfläche rastert ein kleines Auswertefenster über das Messfeld. Hierbei wird in jedem Punkt jeweils die Kreuzkorrelation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Speckle-Bildern gebildet. Die Größe des Auswertefensters lässt sich automatisch berechnen und sollte mindestens drei Speckle auf der Diagonalen enthalten. Ein optimaler Speckle-Durchmesser beträgt nach Zhou und Goodson ca. 2–5 Pixel [10]. Durch die Bestimmung der Verschiebung der Korrelationsmaxima können elastische und plastische Verformungen mit einer räumlichen Auflösung von 22 nm und einer zeitlichen Auflösung im Mikrosekundenbereich rekonstruiert werden [9].

Nach der Berechnung des Punktverschiebungsfeldes  $\mathbf{P}(u, v)$  (wobei  $u$  und  $v$  die Verschiebungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung sind) lässt sich das Gradientenfeld  $\mathbf{F}_{2D}$  der Verformung nach Kajberg [11] bestimmen:

$$\mathbf{F}_{2D} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & 1 + \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Die Polardarstellung des F2D-Felds führt zu

$$\mathbf{F}_{2D} = \mathbf{R}_{2D} \mathbf{U}_{2D}, \quad (2)$$

wobei  $\mathbf{R}_{2D}$  der Rotationstensor ( $\mathbf{R}_{2D}^T \mathbf{R}_{2D} = \mathbf{I}$ ) und  $\mathbf{U}_{2D}$  der gesuchte positiv definite und symmetrische Dehnungstensor ( $\mathbf{U}_{2D}^T = \mathbf{U}_{2D}$ ) ist. Zunächst kann  $\mathbf{F}_{2D}^T \mathbf{F}_{2D} = (\mathbf{R}_{2D} \mathbf{U}_{2D})^T \mathbf{R}_{2D} \mathbf{U}_{2D} = \mathbf{U}_{2D}^T \mathbf{U}_{2D}$  geschrieben werden als

$$\mathbf{U}_{2D}^2 = \mathbf{F}_{2D}^T \mathbf{F}_{2D}. \quad (3)$$

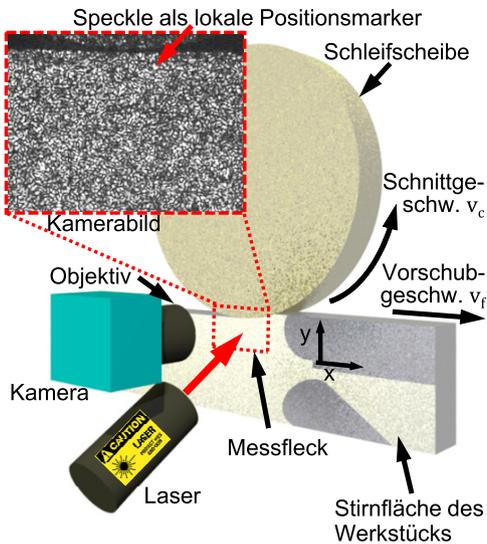


Abb. 1: Mess- und Einsatzprinzip der Speckle-Fotografie beim Flachschleifen.

Um dann die Quadratwurzel zu lösen, wird folgende spektrale Zerlegung verwendet:

$$\mathbf{U}_{2D} = \lambda_1 \mathbf{n}_1 \mathbf{n}_1^T + \lambda_2 \mathbf{n}_2 \mathbf{n}_2^T. \quad (4)$$

Hierbei sind  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  die Quadratwurzeln der Eigenwerte der symmetrischen Matrix  $\mathbf{U}_{2D}^2$  und  $\mathbf{n}_1$  und  $\mathbf{n}_2$  die dazugehörigen Eigenvektoren. Die logarithmische (Hencky-) In-Plane-Dehnung  $\epsilon_{2D}$  ergibt sich schließlich zu [12]

$$\epsilon_{2D} = \ln(\mathbf{U}_{2D}). \quad (5)$$

Das Grundprinzip für die Dehnungsmessungen im Flachschleifprozess ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Messfeld befindet sich auf der Stirnfläche – der unbearbeiteten Seite des Werkstücks – direkt an der Grenze zur bearbeiteten Oberseite. Das Objektiv und die CMOS-Kamera (complementary metal-oxide-semiconductor) mit globalem Shutter sind relativ zum Werkstück fixiert, so dass auftretende Speckle-Bewegungen direkt mit Verschiebungen von Oberflächenpunkten des Werkstücks korreliert werden können.

Out-of-Plane-Verformungen der Oberfläche im Schleifprozess führen zu einer Dekorrelation des Speckle-Musters, wodurch der gewünschte Messeffekt zerstört wird. Der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera (*Optronis: CP70*) mit einer schnellen Bild-zu-Bild-Auswertung bei einer Bildrate von 167 fps reduziert diese Dekorrelation, da die Out-of-Plane-Verschiebung in der kurzen Zeit von  $1/167$  s so gering ist, dass die Speckle-Dekorrelation vernachlässigbar klein ist.

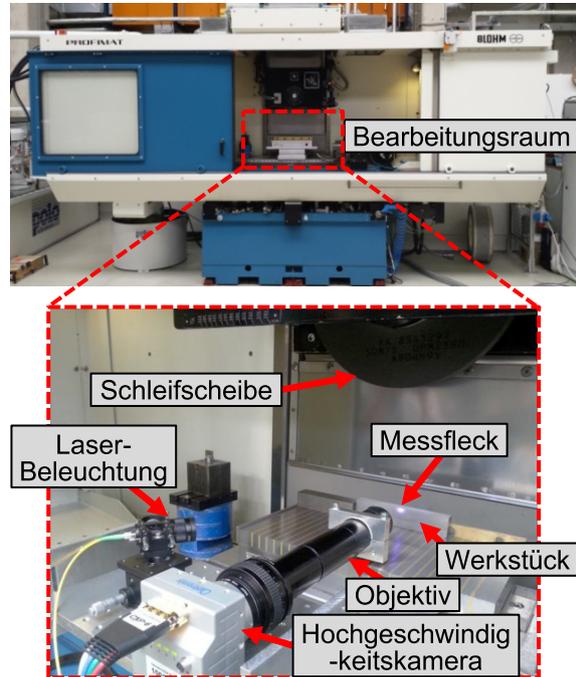


Abb. 2: Blohm Profimat 412 HSG Schleifmaschine und integrierter Messaufbau.

Die gemessenen Verschiebungen in der Objektebene sind in dieser kurzen Zeit entsprechend klein. Mit einer Sub-Pixel-Interpolation können jedoch Verschiebungen von wenigen Hundertstel Pixeln (hier 1 Pixel  $\hat{=}$  1,94  $\mu\text{m}$ ) bestimmt werden [13].

### 3 Experimenteller Aufbau

Die Versuche wurden auf einer *Blohm Profimat 412 HSG* Profilschleifmaschine durchgeführt. Die Umsetzung des Messprinzips ist im unteren, vergrößerten Bereich von Abbildung 2 zu sehen.

Das Werkstück ist als Quader mit einer Länge von 165 mm, 18 mm Breite und 41,5 mm Höhe ausgeführt. Um die Peripheriegeräte (Kamera, Laser ( $\lambda = 405$  nm,  $I = 80$  mW) und optische Komponenten) fest mit dem Messobjekt zu verbinden, werden die Adapter und Halterungen gemeinsam mit dem Werkstück magnetisch gespannt. Die dem Speckle-Messsystem zugewandte Werkstückseite wird vor den Experimenten kugelgestrahlt, um eine raue Oberfläche zu erzeugen, was zu einer ausreichenden Phasenmischung der Laserwellenfront und zur Bildung eines voll entwickelten und homogenen Speckle-Musters führt. Die Messung erfolgt an einer Stelle im mittleren Abschnitt des Werkstücks. Durch die Fixierung des Messaufbaus re-

lativ zum Werkstück bewegt sich der Messaufbau mit der Linearbewegung des Werkstücks in x-Achsenrichtung mit. Die Vorschubgeschwindigkeit  $v_f = 0,5 \text{ m/min}$  beschreibt daher die relative Geschwindigkeit des Schleifscheibenzentrums gegenüber dem Werkstück und dem Messaufbau. Die Schleifscheibe rotiert mit einer Schnittgeschwindigkeit  $v_c = 20 \text{ m/s}$  gegenläufig zur Werkstückbewegung. Somit bewegt sich die Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  der Schleifscheibe in die gleiche Richtung wie  $v_c$  (siehe Abbildung 1).

Ein sich verändernder Flüssigkeitsfilm auf der Messoberfläche (Werkstückseite) führt zu einer ständigen Speckle-Dekorrelation, wodurch der eigentliche Messeffekt verschwindet. Um die In-Prozess-Fähigkeit der Speckle-Fotografie beim Flachsleifen zu demonstrieren, wird im ersten Ansatz ein trockener Schleifprozess betrachtet und auf den Einsatz von Kühlschmierstoff verzichtet.

Das Fehlen der Kühlschmierstoffe führt zu einer starken Entwicklung von Funkenflug (siehe Abbildung 3). Glühende Späne können die optischen Komponenten beschädigen, diese müssen deshalb abgedeckt oder in einem entsprechend großen Abstand vom Punkt des Werkzeugeingriffs positioniert werden. Der große Arbeitsabstand von ca. 90 mm wird mit einem Hochleistungs-Vergrößerungsobjektiv (Rodenstock Apo-Rodagon N) erreicht.

Der Einsatz verschiedener Tuben ermöglicht eine dreifache Vergrößerung und führt so zu einem Messfeld von ca.  $6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ . Um die Optik zu stabilisieren und eine feste Position der Kamera zum Werkstück beim Schleifen zu gewährleisten, wurde eine spezielle Montagevorrichtung entwickelt. Eine Fixierung am vorderen Ende des Objektivs verhindert die Übertragung von Vibrationen von der Maschine auf die Kamera (siehe Abbildung 2). Dadurch werden Schwingungen sowohl für die Messeinheiten als auch für das Werkstück ausgeglichen und es ist möglich, auch während des Schleifvorgangs scharfe Bilder des Werkstücks aufzunehmen.

Nach dem Schleifprozess konnte am Rand der bearbeiteten Oberfläche die Bildung eines Grats festgestellt werden. Die Gratbildung verändert die lokale Neigung der Messfläche, wodurch das Licht aus dem oberen Teil des Werkstückbereichs nicht in die Kamera reflektiert wird. Dies führt zu einem Kontrastverlust des Speckle-Musters an der Oberkante des Werkstücks und damit zu einer hohen Messunsicherheit in diesem Bereich. Daher lässt sich das Verschiebungsfeld der oberflächennahen Kontaktzone nur ab einer Tiefe von ca.  $800 \mu\text{m}$  unterhalb der bearbeiteten Oberfläche berechnen. Unter Berücksichtigung der

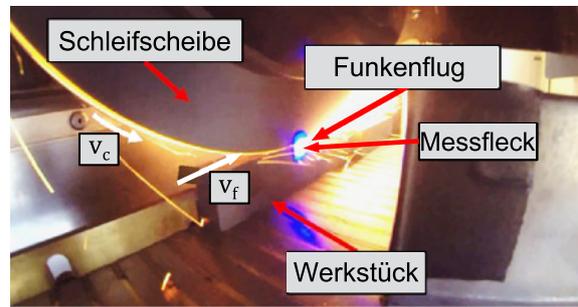


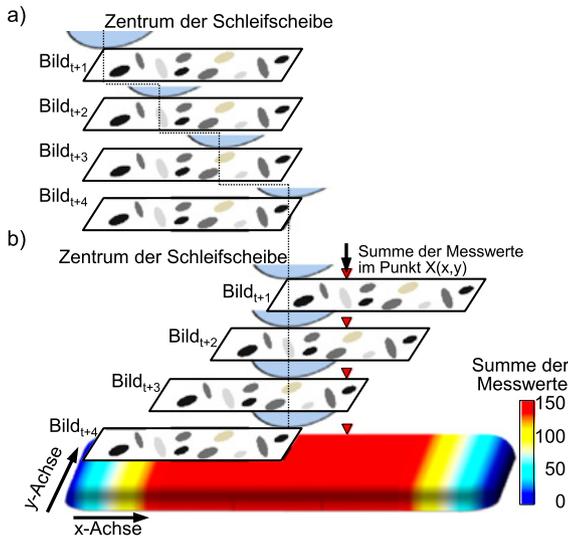
Abb. 3: Flachsleifprozess mit Funkenflug.

Schnitttiefe von  $a_e = 200 \mu\text{m}$  wird daher der Bereich zwischen  $y = 0 \mu\text{m}$  und  $y = -1000 \mu\text{m}$  unter der Oberfläche nicht bewertet (siehe Abbildung 5).

Mit den herkömmlichen Auswerteverfahren der Speckle-Fotografie wird der starke Partikel- bzw. Funkenflug des trockenen Schleifprozesses als Verschiebung von Oberflächenpunkten fehlinterpretiert. Die Partikelbewegung kann durch den Einsatz optimierter Algorithmen allerdings nahezu vollständig herausgerechnet werden. Zu diesem Zweck wird die Größe der Speckle innerhalb des Auswertefensters mit der durchschnittlichen Speckle-Größe im globalen Speckle-Bild verglichen. In der Regel sind störende Partikel durch Funkenbildung deutlich größer als der eingestellte Speckle-Durchmesser und somit sofort erkennbar. In diesem Fall wird die lokale Verformung für die Messposition auf null gesetzt. Damit ist der Fehler, der beim Summieren der Verschiebungen auftritt, aufgrund der hohen Taktfrequenz der Kamera vernachlässigbar.

## 4 Reduzierung der Messunsicherheit

Bei der Speckle-Fotografie ist das  $6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  große Messfeld prinzipiell fest mit dem Werkstück verbunden. Während des Schleifprozesses kommt es zu out-of-plane-Bewegungen der Messebene. Deshalb muss die Aufnahme der zu vergleichenden Speckle-Bilder derart schnell erfolgen, dass keine Dekorrelationen zwischen aufeinanderfolgenden Bildern  $t_n$  und  $t_{n+1}$  auftreten. Es wird also in zwei aufeinanderfolgenden Bildern jeweils das Verschiebungsfeld für das im Werkstücksystem fixe Messfeld berechnet. Da die Verschiebung in der Lagrangeschen Darstellung beschrieben werden soll, müssen die jeweiligen lokalen Auswertefenster der Verschiebung von Oberflächenpunkten hinterherwandern.

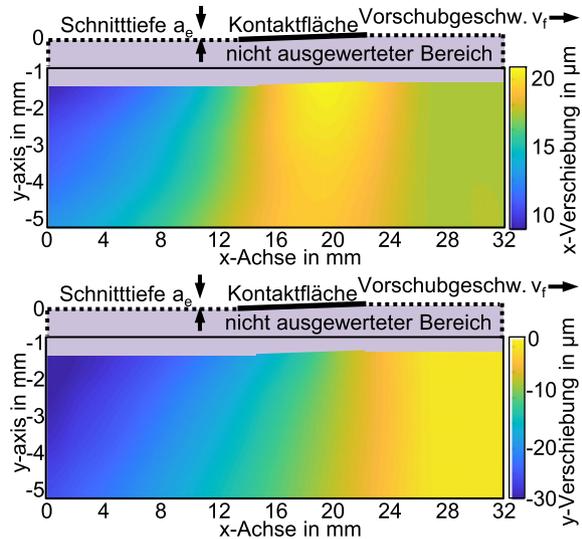


**Abb. 4:** Reduzierung der Messunsicherheit durch Verwendung zeitlich mehrfach gemessener Messwerte. Im Bilderstapel angedeutet sind die durch das Messfeld laufende Schleifscheibe sowie das zum Werkstücksystem fixe Speckle-Muster mit unterschiedlichem Kontrast a) im aufgenommenen Werkstückbezugssystem und b) im transformierten Werkzeugbezugssystem.

Durch das Aufsummieren der einzelnen Bild zu Bild Verschiebungen zu der Gesamtverschiebung kommt es zu einer Summation der Quadrate der Standardmessunsicherheiten. Geht man jedoch von einem makroskopisch homogenen Werkstückmaterial aus, so kann die Messunsicherheit deutlich reduziert und das Messfeld insgesamt vergrößert werden, indem die Zeitreihe der Messung im Werkstückbezugssystem in die Koordinaten des Werkzeugbezugssystems transformiert werden (siehe Bild 4).

In den jeweiligen ausgewerteten lokalen Verschiebungsfeldern des fixen Werkstücksystems kann jede Bildspalte zu jedem Zeitpunkt einer anderen Entfernung zur Schleifscheibe entlang der x-Achse zugeordnet werden. Für den sich ergebenden Bildstapel für fixe Positionen im Werkzeug-Koordinatensystem können der Mittelwert sowie die Messunsicherheit berechnet werden. In Abhängigkeit der Bildaufnahmezeit, der Vorschubrate und Kamerachipbreite ergibt sich eine maximale Stapeltiefe von  $n = 147$ . Die Messunsicherheit verringert sich somit gegenüber dem lokalen Einzelergebnis um den Faktor  $\sqrt{n} = \sqrt{147} \approx 12$ .

Beim Übereinanderlegen des Bildstapels werden Bildbereiche aus unterschiedlichen Positionen des Werkstücksystems gemittelt. Diese unterschiedlichen Positionen besitzen im fixen Messfeld unterschiedliche Werte des Speckle-Kontrasts, in Bild 4 durch unterschiedlich hell dargestellte Speckle im Punkt  $P(x, y)$  verdeutlicht. Somit wird bei der Berechnung der Messunsicherheit über



**Abb. 5:** Speckle-fotografisch gemessene Verschiebungsfelder, jeweils in x- und y-Richtung.

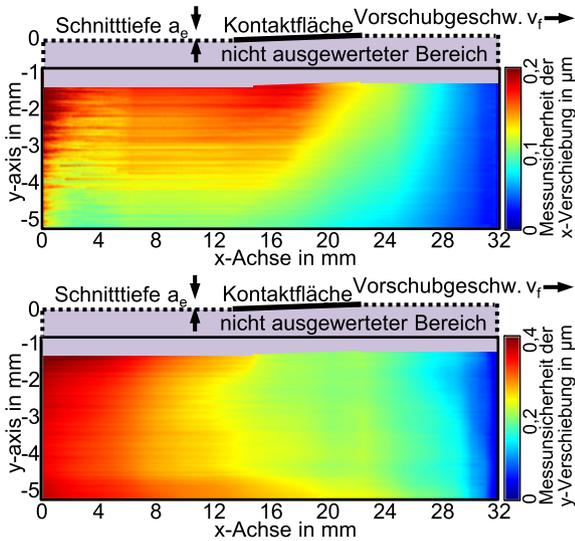
die empirische Standardabweichung der gemittelten Daten neben den zufälligen Störgrößen Schrotrauschen, Kamerarauschen und Quantisierungsfehlern – welche detailliert in [9] betrachtet sind – auch der Einfluss des Speckle-Kontrasts berücksichtigt.

Durch die Annahme eines homogenen Werkstücks und die räumliche Mittelung über verschiedene Oberflächenpunkte können zwar keine Aussagen über die Fein- bzw. Kornstruktur des Materials getroffen werden, auf makroskopischer Ebene ist das zu bearbeitende Material im Fertigungsprozess jedoch in der Regel isotrop.

Mithilfe der Auswertung der zeitlichen Abfolge der Einzelbilder lässt sich der Messbereich in Bewegungsrichtung der Schleifscheibe (x-Richtung) von 8 mm nahezu beliebig erweitern, wobei die Messunsicherheit gegenüber einem einfachen Aneinanderreihen der Einzelergebnisse deutlich reduziert ist. Die Messbereichserweiterung ist aufgrund des begrenzten Speichers der Kamera gegenwärtig auf 32 mm beschränkt.

## 5 Ergebnisse der In-Prozess-Messung für den Flachsleifprozess ohne Kühlschmierstoff

Abbildung 5 zeigt die mittels Speckle-Fotografie an der Stirnfläche des Werkstücks gemessenen Verformungsfelder in x- und y-Richtung. Die tangentielle Kraftkomponente

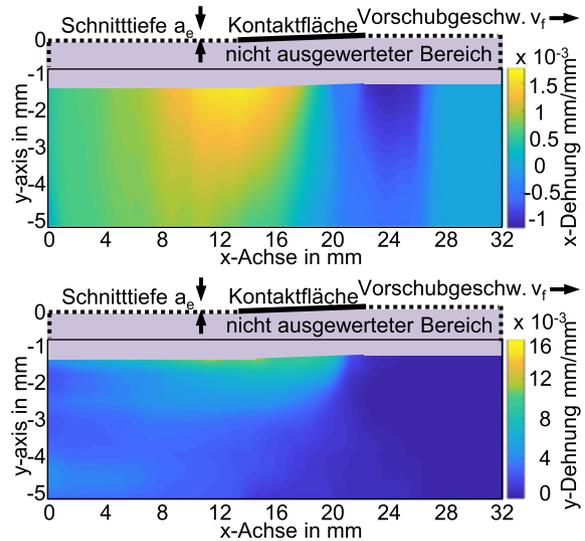


**Abb. 6:** Berechnung lokaler Messunsicherheiten für die Verschiebung in x- und y-Richtung.

verschiebt das gesamte Werkstück um  $10\ \mu\text{m}$  in Richtung der Werkzeugbewegung  $v_c$ . Die maximale x-Verschiebung liegt ca. 2,5 mm nach der ersten Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück und beträgt  $22\ \mu\text{m}$  in Vorschubrichtung. Gegen Ende der Kontaktfläche zwischen Schleifscheibe und Werkstück verringert sich die x-Verschiebung auf ca.  $15\ \mu\text{m}$ . Für die y-Komponente (Bild unten) ist eine Verschiebung nach unten, in negative y-Richtung, zu beobachten. Zehn Millimeter hinter der Schleifscheibe hat sich die Verschiebung in negative Richtung auf  $25\ \mu\text{m}$  erhöht.

Aus der in Kapitel 4 beschriebenen Mittelung der überlagerten, vielfachen Messwerte ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten zufälligen Messunsicherheiten. Die Messunsicherheiten für die x- und y-Verschiebungen steigen zwar mit Zeit – also räumlich gesehen hinter der Schleifscheibe in negative x-Richtung – an, bleiben aber innerhalb des Messbereichs auf ca. 1% vom Maximalwert begrenzt. Somit decken sich die gemessenen Verschiebungen bis auf 20% mit einem simulierten Schleifprozess bei gleichem Energieeintrag [14]. Dies ist bemerkenswert, da in der Simulation die Schleifscheibe lediglich durch eine bewegte Wärmequelle angenähert wurde, welche sich über das Werkstück bewegt. Dies bestätigt die Annahme, dass es sich beim trockenen Schleifprozess hauptsächlich um einen thermisch getriebenen Prozess handelt.

Aus den x- und y-Verschiebungen wurde gemäß Gln. (1)–(5) die Dehnung in der Ebene der Stirnfläche des Werkstücks berechnet. Im oberen Teil von Abbildung 7 ist die Dehnung in x-Richtung aufgetragen. Das Minimum der x-Dehnung liegt ungefähr 2–3 mm vor der Schleifscheibe

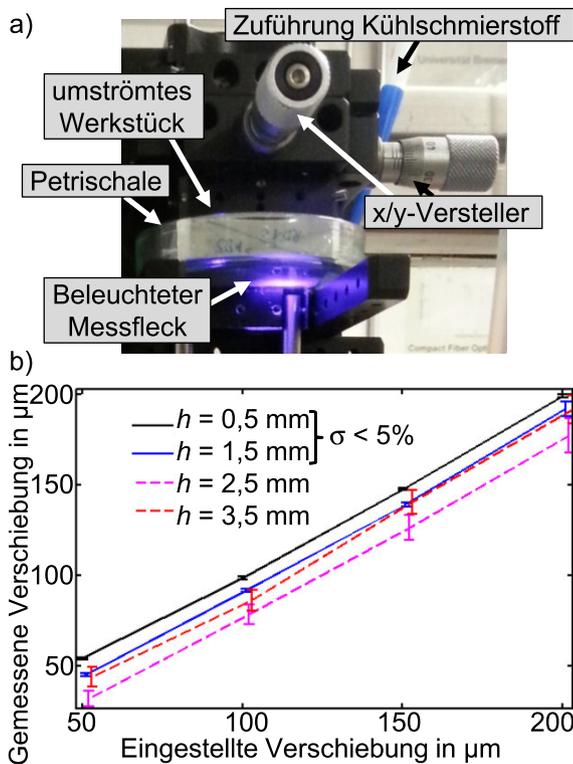


**Abb. 7:** Aus den entsprechenden Verschiebungsfeldern berechnete Dehnungen in x- und y-Richtung.

und hat einen Wert von  $-1,2 \times 10^{-3}\ \text{mm/mm}$ . Direkt hinter der Kontaktzone der Schleifscheibe ist das Maximum der x-Dehnung zu finden, es besitzt einen Spitzenwert von  $1,5 \times 10^{-3}\ \text{mm/mm}$ . Im unteren Teil von Abbildung 7 ist das Dehnungsfeld für die y-Richtung gezeigt. Das Maximum der y-Dehnung liegt am Ende der Kontaktfläche und steigt bis auf Werte von  $16 \times 10^{-3}\ \text{mm/mm}$  an. Auch die gemessenen Dehnungen stehen mit einer Abweichung von weniger als 20% in guter Übereinstimmung zu Simulationen [14]. Die Speckle-Fotografie ist also hinreichend robust, um auch unter den anspruchsvollen Bedingungen des trockenen Flachsleifens mit starkem Funkenflug In-Prozess-Messungen zu ermöglichen.

## 6 Speckle-Fotografie-Messungen unter Einsatz von Kühlschmierstoff

Insbesondere der Einsatz unter realitätsnahen Bedingungen, wie bei der Verwendung von Kühlschmierstoffen, erfordert neue Mess- und Auswertekonzepte der Speckle-Fotografie. In der Regel werden in der Fertigungstechnik bearbeitete Oberflächen mit Kühl- oder Schmiermitteln kontaminiert. Auf mikroskopischer Ebene verändern sich die Schichtdicken dieser Kontaminationsfilme permanent, so dass selbst bei transparenten Fluiden keine statischen, stabilen Speckle-Muster zu beobachten sind. Kann die Variation der Fluidschichtdicke minimiert werden, so

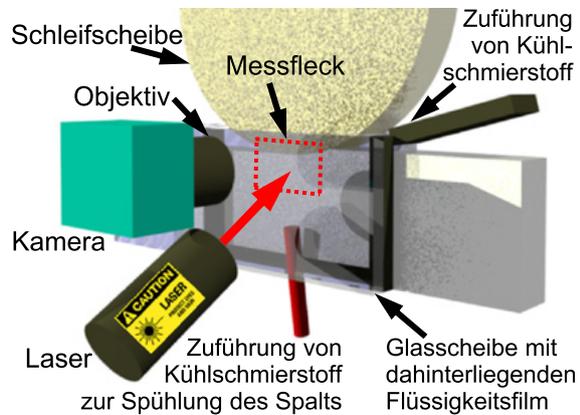


**Abb. 8:** Speckle-Fotografie-Messungen an einem in Öl getauchten Werkstück (a). Gemessene Verschiebung in Abhängigkeit vom eingestellten Wert und der Höhe des Flüssigkeitsfilms  $h$  (b).

lässt sich eine Dekorrelation der Speckle – zumindest bei transparenten, homogenen Fluiden – verhindern. Eine Auswertung mittels Verformungs- und Dehnungsanalyse ist somit möglich.

Diesbezüglich zeigen erste Vorstudien, dass Messungen auch durch begrenzte Flüssigkeitsfilme möglich sind. In einem Laboraufbau (siehe Abbildung 8a) kann eine Probe variabel in eine Petrischale mit Kühlschmierstoff getaucht und eine über den x/y-Versteller eingestellte Verschiebung von unten speckle-fotografisch gemessen werden. Selbst ein Schmierstofffilm von  $h = 1,5$  mm Höhe führt beim Vergleich von eingestellter und gemessener Verschiebung lediglich zu Messabweichungen von unter 5% (siehe Abbildung 8b). Voraussetzung ist allerdings eine begrenzte, transparente Fläche, durch die eine konstante Schichtdicke garantiert ist.

Die praktische Umsetzung dieser Voraussetzung ist möglich, indem die Stirnfläche des Werkstücks durch eine Glasplatte abgedeckt und der Bearbeitungsprozess durch die Glasscheibe hindurch mit dem Messsystem beobachtet wird. Der Spalt zwischen Glasplatte und Werkstück kann bis zu 1,5 mm betragen und sollte von unten kontinuierlich mit Kühlschmierstoff gespült werden (siehe Abbildung 9).



**Abb. 9:** Prinzipieller Aufbau für Verschiebungsmessungen beim Schleifen unter Einsatz von Kühlschmierstoffen.

Partikel und Fremdkörper lassen sich so permanent mit dem Kühlschmierstoff nach oben aus dem Spalt herausdrücken, wobei durch die über das Werkstück heraustretende Flüssigkeit gleichzeitig die Kühlung der Oberfläche erfolgt.

Folglich ist die im trockenen Schleifprozess erprobte Speckle-Fotografie prinzipiell auch geeignet, um Schleifprozesse mit Kühlschmierstoffeinsatz zu untersuchen und somit einen Beitrag zum Verständnis des Schleifprozesses bzw. zum Aufstellen einer Prozesssignatur für den Schleifprozess zu liefern.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag werden während eines Schleifprozesses prozessbegleitend Verschiebungs- und Dehnungsfelder optisch gemessen. In dem zunächst betrachteten, trockenen Schleifprozess ohne Kühlschmierstoff entsteht starker Funken- bzw. Partikelflug, welcher sich mit Schnittgeschwindigkeit durch das Sichtfeld des Messsystems bewegt. Trotz des störenden Funkenflugs sind, mit entsprechend angepassten Auswerteverfahren der Speckle-Fotografie, In-Prozess-Dehnungsmessungen möglich. Die Dehnungsanalysen zeigen, dass der Energieeintrag sehr lokal erfolgt. Da die Ergebnisse nur um 20% von Simulationen unter Annahme einer konstant bewegten Wärmequelle [14] differieren, sind die eingebrachten Verformungen und Dehnungen im trockenen Schleifprozess offensichtlich in erster Linie thermischer Natur.

Labormessreihen durch einen begrenzten Kühlschmierstofffilm verdeutlichen den Einfluss der Schichtdicke des Fluids auf die Speckle-Fotografie-Messung. Selbst bei Fluidschichtdicken von 1,5 mm steigt die Messabweichung

chung auf lediglich 1,5 %, wenn mittels einer Glasscheibe ein definierter Phasenübergang geschaffen wird. Die Ergebnisse geben somit Anlass, den Einsatz der Speckle-Fotografie auch auf weitere Fertigungsprozesse unter realitätsnahen Bedingungen und der Verwendung von Kühlschmierstoffen zu erweitern.

Beispielsweise wird aktuell ein Messaufbau für das Flachsleifen implementiert, bei dem der Spalt zwischen Werkstück und Messsystem bzw. einer begrenzenden Glasscheibe vollständig mit Kühlschmierstoff gefüllt ist. Nach der erfolgreichen Messung der Beanspruchung und der im Werkstück verbleibenden Modifikation unter dem Einsatz von Kühlschmierstoffen lässt sich so die Prozesssignatur für dieses Fertigungsverfahren aufstellen. Weiterhin kann das Messsystem zukünftig an die Kinematiken weiterer Fertigungsprozesse angepasst bzw. entsprechend erweitert werden, um einen Vergleich von verschiedenen Fertigungsverfahren und eine prozessübergreifende Beschreibung mittels Prozesssignatur zu realisieren.

**Danksagung:** Sie danken auch Ewald Kohls (Teilprojekt F01) und seinen Kollegen aus dem Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT) für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der In-Prozess-Messungen.

**Finanzierung:** Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Transregionalen Sonderforschungsbereichs SFB/TRR 136 "Prozesssignaturen", insbesondere des Teilprojekts C06.

## Literatur

1. Brinksmeier, E.; Klocke, F.; Lucca, D. A.; Sölter, J.; Meyer, D.: Process Signatures – a new approach to solve the inverse surface integrity problem in machining processes. *Procedia CIRP* 2014, 13, 429–434.
2. Brinksmeier, E.; Meyer, D.; Heinzel, C.; Lübben, T.; Sölter, J.; Langenhorst, L.; Frerichs, F.; Kämmler, J.; Kuschel, S.; Kohls, E.: Process Signatures – the missing link to predict surface integrity in machining. *Procedia CIRP* 2018, 71, 3–10.
3. Rastogi, P. K.: *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*. New York: Wiley, 2001.
4. Lu, M.; Wang, S.; Bilgeri, L.; Song, X.; Jakobi, M.; Koch, A. W.: Online 3D displacement measurement using speckle interferometer with a single illumination-detection path. *Sensors* 2018, 18, 1923 (14 S.).
5. Archold, E.; Burch, J. M.; Ennos, A. E.: Recording of in-plane surface displacements by double-exposure speckle photography. *Opt. Acta* 1970, 17, 12, 883–898.
6. Stetson, K. A.: A review of speckle photography and interferometry. *Opt. Eng.* 1975, 14, 5, 482–489.
7. Fischer, A.: Fundamental uncertainty limit for speckle displacement measurements. *Applied Optics* 2017, 56, 7013–7019.
8. Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Dumstorff, G.; Sarma, M.; Heinzel, C.; Lang, W.; Goch, G.: Systems for locally resolved measurements of physical loads in manufacturing processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2015, 64, 1, 495–498.
9. Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Fischer, A.: Precise in-process strain measurements for the investigation of surface modification mechanisms. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2018, 2(1), 9 (11 S.).
10. Zhou, P.; Goodson, K. E.: Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC). *Optical Engineering* 2001, 40, 8, 1613–1620.
11. Kajberg, J.; Lindkvist, G.: Characterisation of materials subjected to large strains by inverse modelling based on in-plane displacement fields. *International Journal of Solids and Structures* 2004, 41, 3439–3459.
12. Eman, J.; Sundin, K. G.; Oldenburg, M.: Spatially resolved observations of strain fields at necking and fracture of anisotropic hardened steel sheet material. *International Journal of Solids and Structures* 2009, 46, 2750–2756.
13. Tausendfreund, A.; Stöbener, D.; Goch, G.: Measuring technique for the detection of process force related component deformations in metalworking manufacturing processes. In: Zoch, H. W.; Lübben, T. (Hrsg.): *5th International Conference on Distortion Engineering (IDE)*, Bremen 2015, 355–364.
14. Tausendfreund, A.; Borchers, F.; Kohls, E.; Kuschel, S.; Stöbener, D.; Heinzel, C.; Fischer, A.: Investigations on material loads during grinding by speckle photography. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2018, 2(4), 71 (12 S.).

## Autoreninformationen

**Andreas Tausendfreund**  
 Universität Bremen, Bremer Institut für  
 Messtechnik, Automatisierung und  
 Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Str.  
 13, D 28359 Bremen, Germany  
[a.tausendfreund@bimaq.de](mailto:a.tausendfreund@bimaq.de)

Andreas Tausendfreund studierte Physik an der Universität Bremen und ist seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIMAQ, Arbeitsgruppe „In-prozess Messtechnik und Optik“ Seine Arbeitsgebiete sind der Einsatz von optischen Messverfahren in Fertigungsprozessen und die Untersuchung und Beschreibung der Lichtstreuung an Nanostrukturen auf der Basis von Maxwell-Gleichungen.

**Dirk Stöbener**

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

**Andreas Fischer**

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

Dirk Stöbener absolvierte ein Physik-Studium an der Universität Bremen und ist seit 2000 am BIMAQ als Leiter der Arbeitsgruppe „Inprozess Messtechnik und Optik“ tätig. Seine Forschungsinteressen umfassen akustische und optische Verfahren zur fertigungsnahen Messung von Werkstückeigenschaften wie z. B. den Dimensionen, der Verformung oder der Rauheit.

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.