

Aerosole als Mikrosonden für die indirekte Geometriemessung

Aerosols as micro probes for the indirect geometry measurement

Andreas Tausendfreund¹, Björn Feld¹, Gert Behrends¹, Andreas Fischer^{1,2}

¹Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen, E-Mail: a.tausendfreund@bimaq.de

²Universität Bremen, MAPEX Center for Materials and Processes

Aerosol, Partikelströmung, Fluoreszenz, PIV, indirekte Geometriemessung

Aerosol, particle flow, fluorescence, PIV, indirect geometry measurement

Zusammenfassung

Die Fertigung von mikrostrukturierten Bauteilen wird hinsichtlich der erzeugten Geometrien und der verwendeten Werkstoffmaterialien immer flexibler und erfordert präzise und vielseitig einsetzbare Geometriemessverfahren. Optische Messverfahren ermöglichen hochpräzise Messungen, sind aber auf kooperative Oberflächen angewiesen. Um die Abhängigkeit von den optischen Oberflächenreaktionen zu überwinden, wird in einem neuen Ansatz vorgeschlagen, die Oberfläche eines Messobjekts indirekt mit Hilfe eines konfokalen Fluoreszenzmikroskops und einem Aerosolstrom aus fluoreszierenden Mikropartikeln zu bestimmen.

Gemessen wurden 100 µm hohe Stufengeometrien aus drei unterschiedlichen, optisch unkooperativen Kunststoffen, weißes, leicht transluzentes Polytetrafluorethylen (PTFE), tiefschwarzes Polymethylmethacrylat (PMMA) und grünes Polyethylen (PE). Alle drei Materialien sind herausfordernd für die direkte Messung mit optischen Standard Referenzverfahren. Als Ergebnis liefert die indirekte Geometriemessung bei einer flachen, parallelen Anströmung mit Fluoreszenzpartikeln eine materialunabhängige Messunsicherheit von 5 µm und liegt im Rahmen der zugrundeliegenden Oberflächenrauheit in Übereinstimmung mit dem verwendeten weißlichtinterferometrischen Referenzmessverfahren.

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die Qualitätsprüfungen und Qualitätskontrolle von präzise hergestellten Mikrogeometrien erfordern nach der goldenen Regel der Messtechnik zehnfach genauere Geometriemessverfahren. Neue additive Fertigungstechnologien erhöhen neben der Form- zusätzlich die Materialvielfalt der gefertigten Produkte. Daher wird ein universeller Messansatz gewünscht, der eine ausreichende sowie konstante Messqualität liefert und unabhängig von Variationen Objektgeometrie, -oberfläche und -materialeigenschaft ist.

1.2 Stand der Technik

Die optische Messtechnik ermöglicht berührungslose, schnelle sowie präzise Messungen im Mikro- und Nanometerbereich und ist somit prädestiniert für den Einsatz in der Fertigung. Der typische Ansatz für optische Geometriemessungen besteht bisher darin, die Reaktion der Oberfläche auf einfallendes Licht direkt zu messen. Diese direkten optischen Messverfahren werden zunehmend in Produktionsumgebungen eingesetzt, erfordern jedoch eine kooperative

Objektoberfläche. Dies bedeutet, dass ein ausreichender Anteil des Lichts von der Objektoberfläche zur Erfassungseinheit reflektiert werden muss. Wenn das Material des Objekts zu viel Licht absorbiert oder die Streuung des Oberflächenlichts in Richtung der Erfassungseinheit zu gering ist (z. B. aufgrund eines steilen Oberflächenneigungswinkels), schlägt die optische Messung fehl. Die Herausforderung der Messung an steilen Oberflächengradienten tritt insbesondere bei prozessnahen Messungen auf, bei denen der optische Zugang begrenzt ist und eine Änderung der Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung oder der Werkstückausrichtung aus prozessbedingten Gründen schwierig ist.

Ein häufig eingesetztes direktes optisches Messverfahren ist die Weißlicht-Interferometrie (WLI). Die WLI ist in der Lage, planare kooperative Objekte wie modifizierte Metalloberflächen [1], ganze Siliziumwafer [2] oder optische Komponenten mit einer komplexeren Form wie Asphären [3] mit Nanometergenauigkeit zu messen. Allerdings wird die WLI-Messung an Oberflächen mit steilen Kanten und optisch unkooperativen Oberflächen immer unzuverlässiger [4]. Die konfokale Mikroskopie ist eine weitere gängige Technik zur Erfassung der Oberflächentopografie. Bei einem Konfokalmikroskop fallen die Brennpunkte der Lichtquelle und der Beobachtungsoptik zusammen. Durch eine Lochblende vor dem Fotodetektor wird das Licht oberhalb und unterhalb des konfokalen Volumens herausgefiltert, was auch als optischer Schnitt bezeichnet wird. Wenn das konfokale Volumen senkrecht zur Oberfläche abtastet, hat die detektierte Signalintensität ein gut erkennbares Maximum, sobald sich die Objektoberfläche genau in der Mitte des Brennpunkts befindet. Das Signal nimmt stark ab bevor und nachdem die Oberfläche das konfokale Volumen passiert hat [7]. Da die Grundidee der konfokalen Mikroskopie darin besteht, das Licht aufzuzeichnen, das direkt aus dem beleuchteten Fokusbereich kommt, hat auch diese Technik Probleme mit steilen Oberflächengradienten. Je steiler und glatter die Oberfläche ist, desto weniger Licht gelangt in die Optik des konfokalen Mikroskops, was wiederum die Fähigkeit einschränkt, die Position der Oberfläche mit ausreichender Präzision zu bestimmen [8].

Die Einflüsse von Form, Oberfläche und Material auf die optische Geometriemessung werden bei einem indirekten optischen Messverfahren vermieden. Die indirekte Geometriemessung ist ein relativ neuer Ansatz, der auf dem Ansatz der konfokalen Mikroskopie beruht, jedoch nicht von den optischen Eigenschaften des Messobjekts beeinflusst wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht das von der Oberfläche reflektierte oder gestreute Licht ausgewertet wird, sondern die optische Antwort des umgebenden Mediums. Der indirekte Messansatz wurde von Mikulewitsch et al. [11] erfolgreich für ein Werkstück in einer flüssigen Umgebung umgesetzt, indem die Fluoreszenzantwort einer Rhodamin-B-Lösung mit einem Konfokalmikroskop gemessen wurde. Mit einer modellbasierten Auswertung des Signals war es möglich, die Stufenhöhe der Werkstückoberfläche mit einer Unsicherheit in der Größenordnung von $u(h) = \pm 10 \mu\text{m}$ zu messen, wobei das Werkstück aus Messing bestand und die nominale Stufenhöhe $250 \mu\text{m}$ betrug. Weitere Experimente mit einem schrägen Messobjekt zeigten, dass der Ansatz auch bei großen Oberflächenneigungen mit einem Neigungswinkel von bis zu 85° funktioniert [12]. Das Messkonzept wurde realisiert, um die Messung von Mikrogeometrien auf metallischen Teilen in der Fertigungsumgebung der laserchemischen Bearbeitung, d. h. in einer flüssigen Umgebung, zu ermöglichen. Ein ähnlicher Ansatz wurde von Takaya et al. vorgestellt, wobei das Fluoreszenzsignal des Schneidöls zur Bestimmung des Werkzeugverschleißes in einem Zerspanungsprozess verwendet wurde [13]. Während der Ansatz bereits einen dünnen Flüssigkeitsfilm entsprechend der Prozessumgebung verwendet, fehlt eine indirekte Messtechnik, die nicht auf die Oberflächenbedeckung mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit angewiesen ist. In der Tat ist eine indirekte optische Messtechnik für die Luftumgebung wünschenswert, um die potenziellen Anwendungsbereiche in der Fertigung zu erweitern.

1.3 Ziel

Ziel dieses Artikels ist es, ein indirektes optisches Geometriemessverfahren in der Luft einzuführen, das universell auf Objekte mit unterschiedlichen Formen und insbesondere deren Materialeigenschaften anwendbar ist. Dazu soll eine fluoreszierende Aerosolströmung verwendet werden, um eine optische Antwort der umgebenden Luft zu erhalten und die Oberflächenposition des Objekts durch das Fehlen des gescannten Fluoreszenzsignals zu bestimmen. In Experimenten soll weiterhin gezeigt werden, dass die indirekte Messung unbeeinflusst von den Materialien der Messobjekte ist und welche Messunsicherheiten derzeit erreichbar sind.

2. Prinzip der indirekten Geometriemessung

2.1 Konfokale Fluoreszenzmikroskopie

Die Messmethode lehnt sich im Prinzip stark an die Arbeit von Mikulewitsch et al. [11] an. Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des vorgeschlagenen Messaufbaus. Das Laserlicht, das im konfokalen Volumen fokussiert wird, regt fluoreszierende Moleküle an, die in fein verteilten Tröpfchen gelöst sind und ein Aerosol bilden. Das von diesen Molekülen emittierte Fluoreszenzlicht hat entsprechend der Stokes-Verschiebung eine etwas längere Wellenlänge. Dieses Licht wird dann zusammen mit dem gestreuten Laserlicht vom Objektiv aufgefangen. Da das Fluoreszenzlicht eine größere Wellenlänge hat als das Anregungslicht, kann das Anregungslicht mit einem Langpassfilter herausgefiltert werden. Die Blende sorgt dabei dafür, dass Licht von außerhalb des konfokalen Volumens abgeschwächt und die empfindliche Avalanche-Photodiode nur das emittierte Fluoreszenzlicht von den Tröpfchen innerhalb des konfokalen Volumens messen kann.

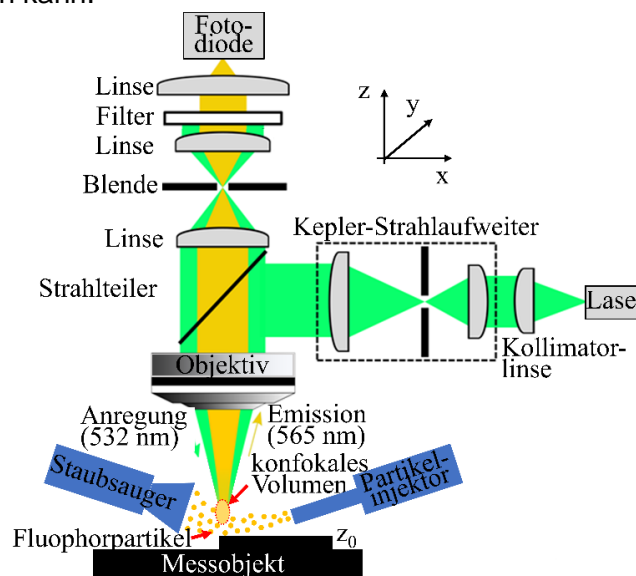


Abb. 1: Ein Schema des vorgeschlagenen indirekten Geometriemesssystems.

2.2 Signalmodell

Es wird davon ausgegangen, dass solange sich das konfokale Volumen unterhalb der Oberfläche des Objekts befindet, keine Partikel erkannt werden. Wenn sich das konfokale Volumen in z-Richtung bewegt, steigt oberhalb der Oberfläche die Anzahl der detektierten Partikel. Die Rate der Partikelerkennung ist eine Funktion der Größe und Form des konfokalen Volumens sowie der Partikeldichteverteilung und des Geschwindigkeitsprofils des Aerosols. Da die detektierte Intensität von mehreren unbekanntem Eigenschaften des Aerosols wie der Anzahl der Partikel im Volumen, Größe der Partikel, Flugbahn der Partikel durch das Volumen abhängt, wird angenommen, dass die Intensität zu zufällig ist, um sie für eine Geometriebewertung zu verwenden. Stattdessen wird nur die Anzahl der erkannten Partikelereignisse verwendet.

Ein Partikelereignis ist an einem charakteristischen kurzen Puls im Detektorsignal zu erkennen. Dieses Partikelereignis ist selten, da es nur etwa 1 % der Zeit auftritt. Durch Anwendung eines auf dem Grubbs-Test basierenden Algorithmus zur Ausreißerererkennung können diese seltenen Partikelereignisse aus dem Rohsignal herausgefiltert werden, von dem angenommen wird, dass es nur aus zufälligem Hintergrundrauschen und Partikelereignissen besteht. Ausgehend von null detektierbaren Partikelereignissen innerhalb des Objekts steigt die Anzahl der detektierbaren Ereignisse mit dem Eintritt des konfokalen Volumens in den Aerosolstrom an. Die Häufigkeit der Partikelereignisse wird kumuliert, um das Partikelsignal zu erzeugen, welches für die Geometriebewertung verwendet wird. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Partikelsignal die Form einer Fehlerfunktion hat:

$$S(z) = A(\operatorname{erf}(z - z_0) + 1). \quad (1)$$

Die Gleichung (1) wird folglich als Signalmodell zur Anpassung an das Messsignal der erkannten Anzahl von Aerosolpartikeln verwendet. Die Position z_0 , die die Position der Oberfläche ist, wird als Wendepunkt der Fehlerfunktion definiert. Eine detaillierte Beschreibung der Signalauswertung und dem Einfluss der oberflächennahen Änderungen der Partikelgeschwindigkeiten ist in der Arbeit von Feld et al. [16] zu finden.

3. Experimenteller Aufbau

3.1 Konfokales Mikroskop

Der vollständige Aufbau der konfokalen Mikroskopie ist in Abb. 2 dargestellt. Er verwendet einen Anregungslaser mit einer Wellenlänge von 532 nm ein 20x/0,4 Mikroskop mit einem Arbeitsabstand von 20 mm. Das emittierte Fluoreszenzlicht läuft zunächst durch einen Strahlteiler und wird danach mit Hilfe einer 20 μm großen Lochblende räumlich gefiltert. Bevor das Licht aus dem konfokalen Volumen mit einem Linsensystem auf eine Avalanche-Photodiode trifft, wird es abschließend mit einem 550-nm-Langpass-Filter gefiltert, so dass nur Fluoreszenzlicht den Detektor erreicht. Die Abmessungen des konfokalen Volumens wurden durch Messung der Signalantwort eines Fluoreszenzstreifens mit getrocknetem Farbstoff auf einem Glasschieber geschätzt. Die radiale Ausdehnung des konfokalen Volumens beträgt $d_{r,setup} = 5 \mu\text{m}$ und die axiale Größe des konfokalen Volumens wurde mit $d_{z,setup} = 30 \mu\text{m}$ bestimmt.

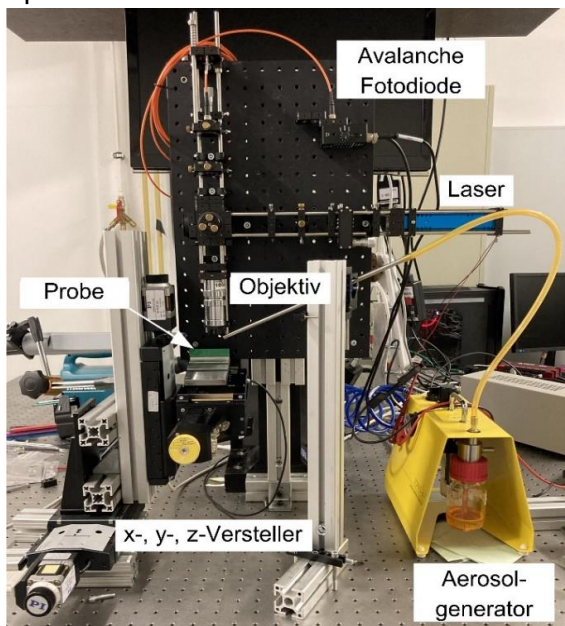


Abb. 2: Aufbau des konfokalen Mikroskops, einschließlich der Positioniereinheiten und des Aerosolgenerators.

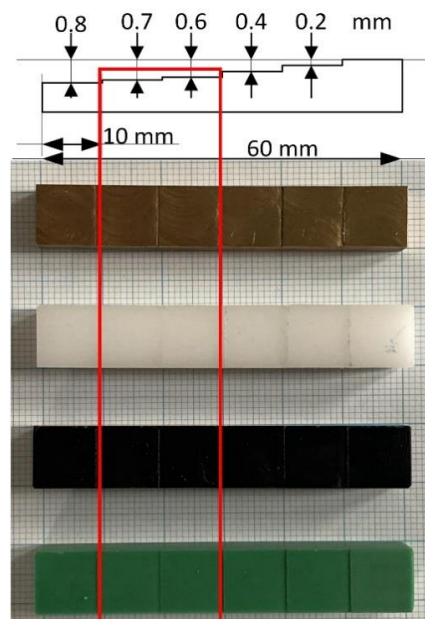


Abb. 3: Zeichnung der Stufengeometrie und Fotos der Messobjekte aus Messing, weißen PTFE, schwarzen PMMA und grünen PE.

Die Messobjekte werden in X-, Y- und Z-Richtung durch Lineartische mit einer bidirektionalen Positionsunsicherheit von 1 μm bewegt. Das Intensitäts-Höhen-Signal wird in einer Sweep-Bewegung aufgenommen. Das bedeutet, dass bei jeder X-Position über dem Objekt eine kontinuierliche, Scanbewegung (3 mm) mit dem Z-Achsen-Positionierer bei einer Geschwindigkeit von 500 $\mu\text{m/s}$ durchgeführt wird. Daraus ergibt sich bei einer x-Schrittweite von 300 μm eine Messzeit von ca. 10 Minuten für die gesamten 25 mm des verfügbaren Weges des X-Tisches. Der Aerosolstrom wird von einem TOPAS ATM 220 Aerosolgenerator mit einer Zweiphasendüse und einer Prallabscheiderplatte bereitgestellt. Die flüssige Phase des Aerosols besteht aus DEHS und hat eine mittlere Partikelgröße von 1 μm . Das Aerosol wird in einer Freistrahkonfiguration abgegeben. Der Freistrah tritt aus einem Rohr mit 5 mm Durchmesser aus und wird mit einem Winkel von 30° auf die Stufegeometrie gerichtet. Die mittlere Geschwindigkeit des Aerosols in der Mitte des Freistrahls beträgt 1 m/s und nimmt nach der Theorie von Blasius mit zunehmender Nähe zur Oberfläche ab, wobei sie direkt an der Oberfläche gegen Null geht.

3.2 Messobjekt

Die Messobjekte für diesen Artikel wurden angefertigt, um die Vorteile des InOGEM-Verfahrens zu demonstrieren. Bei den Objekten handelt es sich um rechteckige Stäbe mit gefrästen Stufen, die aus verschiedenen Materialien bestehen. In Abb. 3 ist eine schematische Zeichnung zu sehen, darunter Fotos der jeweiligen Messobjekte aus verschiedenen Materialien. Die Stufen sind 60 mm lang, 10 mm breit und zwischen 100 μm und 200 μm hoch. Die Materialien für den Probekörper (Messing, PTFE, PMMA und PE) wurden aufgrund ihrer optischen Eigenschaften ausgewählt. Die Herstellung der Stufen erfolgte mittels einer Fräse ohne zusätzlichen Polierschritt, daher variiert ihre Rauheit aufgrund der materialabhängigen Bearbeitbarkeit. Die Geometrien der Stufen werden in der Mitte der Breite der Objekte gemessen. Die Stufenhöhen werden nach ISO 5436-1 [14] berechnet, die die Messung von Stufen anhand des mittleren Drittels der Stufenplatten vorschreibt.

4. Ergebnisse

4.1 Referenzmessung der Geometrie

Als Referenzmesssystem wird ein Weißlichtinterferometer (WLI) verwendet, das – wie im Stand der Technik adressiert – Probleme mit der Messung von Objekten mit Kanten und optisch unkooperativen Oberflächen hat. Die Ergebnisse der WLI-Referenzmessungen der Stufegeometrieversuche sind in Abb. 4 dargestellt.

Die Rohdaten der 3-dimensionalen WLI-Messungen – ohne softwaremäßige Filterung mit der Auswertesoftware – wurden hierfür zunächst in Segmente entsprechend der Größe des konfokalen Volumens des Fluoreszenzmikroskops eingeteilt und über diese Bereiche gemittelt. Die Profillinie wurde dann jeweils durch das Zentrum des Messfeld gelegt und die Messwertdichte entsprechend der indirekten Geometrie-Messung angepasst.

Die aus dem roten Datenpunkten berechneten Stufenhöhen nach ISO 5436-1 liegen im Bereich zwischen 90 μm und 105 μm , wobei die zugehörigen Messunsicherheiten jeweils unter einem Mikrometer liegen. Die Rauheit in diesem Bereich der Stufen liegt zwischen 0,5 μm und 1,1 μm . Diese Abweichung ist auf die Herstellung der Proben zurückzuführen. Sie wurden nach dem Fräsen nicht poliert, so dass die Fräsriefen, die durch die Bearbeitung des Materials entstanden, auf der Oberfläche verblieben.

Die Profile sehen erwartungsgemäß recht ähnlich aus. Im Vergleich besitzt die Messingstufe gegenüber den Kunststoffstufen die höchste Rauheit. Diese Abweichungen ist am ehesten auf den Herstellungsprozess auf einer Fräsmaschine zurück zu führen. Die Spitzen an den Stufenkanten der Kunststoffproben bei $x = 0$ mm sind ein Artefakt, das durch die Unzulänglichkeit

des WLI bei der Messung an steilen Kanten verursacht wird, was sich in Form von so genannten „Batwings“ [15] zeigt. Bei der transluzenten PTFE-Probe tritt dieser Effekte nicht so stark auf. Insbesondere jedoch bei der optisch unkooperativen, schwarzen PMMA-Probe aber auch bei der grünen PE-Probe zeigt sich dieses materialabhängige Phänomen besonders stark mit einer Überhöhung von bis zu 30 μm . Dies verdeutlicht das Problem der Weißlichtinterferometrie an stark geneigten und optisch unkooperativen Oberflächen.

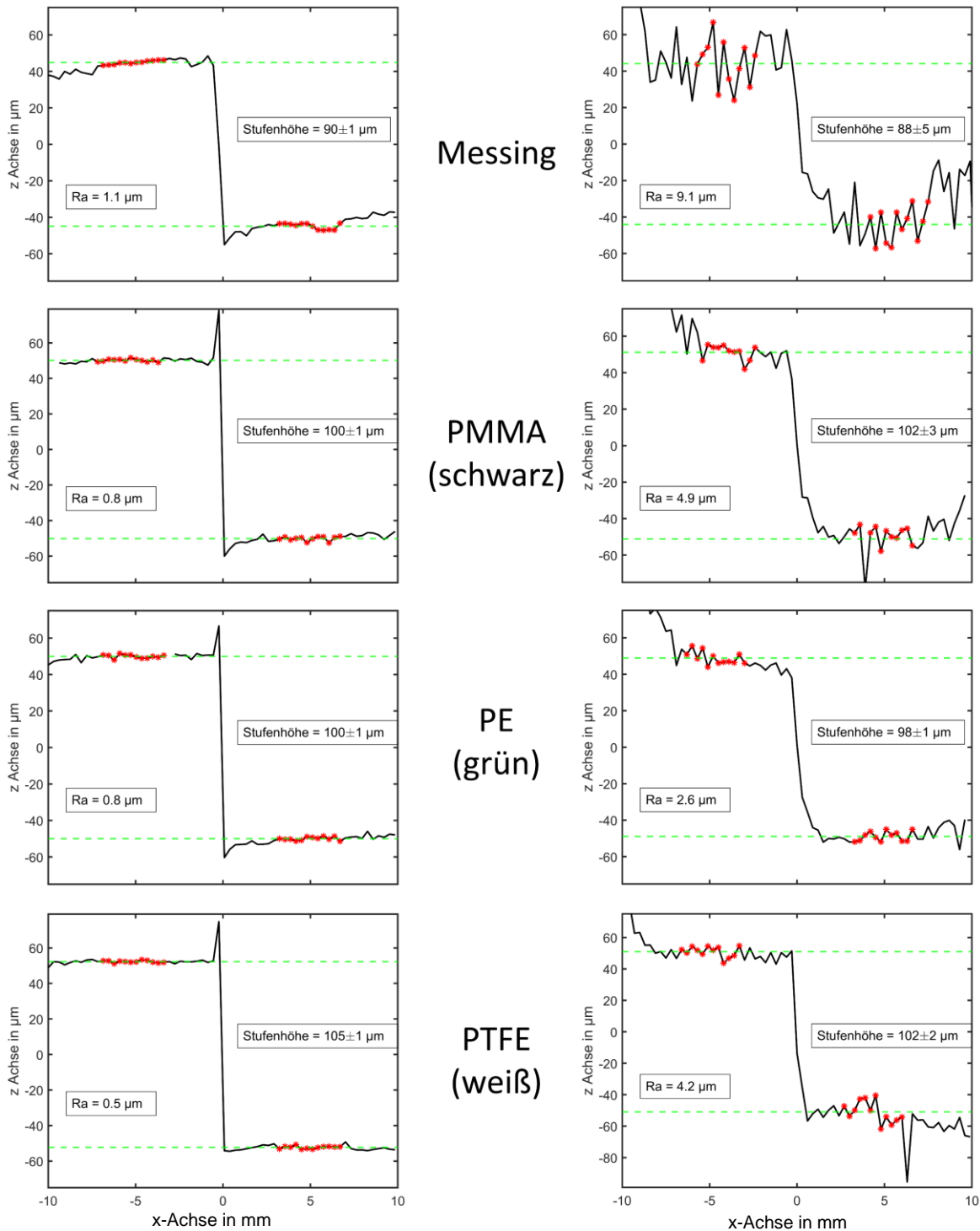


Abb. 4: Weißlichtinterferometrische Referenzmessungen an den 100 μm hohen Stufen der unterschiedlichen Proben aus Messing, PMMA, PE und PTFE.

Abb. 5: Indirekte Geometriemessung an den 100 μm hohen Stufen der unterschiedlichen Proben aus Messing, PMMA, PE und PTFE.

4.2 Indirekte Geometriemessung

Die aufgezeichneten Stufengeometrien der vier Objekte aus unterschiedlichen Materialien sind in Abb. 5 dargestellt. Für die Berechnung der Stufenhöhe gemäß ISO 5436-1 werden wie bei der WLI-Messung nur die im mittleren Drittel der Stufenebenen rot hervorgehobenen Datenpunkte berücksichtigt. Die gemessenen Stufenhöhen liegen hier im Bereich zwischen $88\ \mu\text{m}$ und $102\ \mu\text{m}$. Bei berechneten Messunsicherheiten von $1\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$, stimmen diese Ergebnisse mit den Referenzmessungen überein.

Die berechneten Rauheiten liegen mit Werten von $2,6\ \mu\text{m}$ bis $9,1\ \mu\text{m}$ deutlich über denen aus den WLI-Messungen. Diese Abweichungen müssen auf das noch relativ große konfokale Volumen (radial $5\ \mu\text{m}$, axial $30\ \mu\text{m}$) des neuartigen Messsystems zurückgeführt werden und nicht auf die Rauheit der Probe. Dennoch sind an den Stufenkanten keine materialabhängigen Überschwinger zu erkennen, was die Annahme der materialunabhängigen Messfähigkeit des Ansatzes bestärkt.

Ein nachteiliger Effekt an den Kanten ist jedoch ein offensichtlich nicht ganz so steiles Abfallen der Stufe wie bei der Referenzmessung. Um dieses Phänomen zu klären, wurden Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen durchgeführt.

4.3. Particle Image Velocimetry Messung (PIV)

In den PIV Strömungsfeldmessungen in Abb. 6 ist ein deutliches Abfallen der Geschwindigkeitsprofils nahe der Objektsoberfläche zu beobachten. (Der hier vernachlässigbare Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf den Messansatz werden in [16] diskutiert.) Gleichzeitig ist in den Rohbildaufnahmen zu erkennen, dass sich im „Windschatten“ der Stufe wenig bis gar keine Partikel befinden. Die Abwesenheit von Partikeln entspricht zwangsläufig dem Fehlen einer Fluoreszenz, weshalb der Beginn der Stufe deutlich zu früh angesetzt wird.

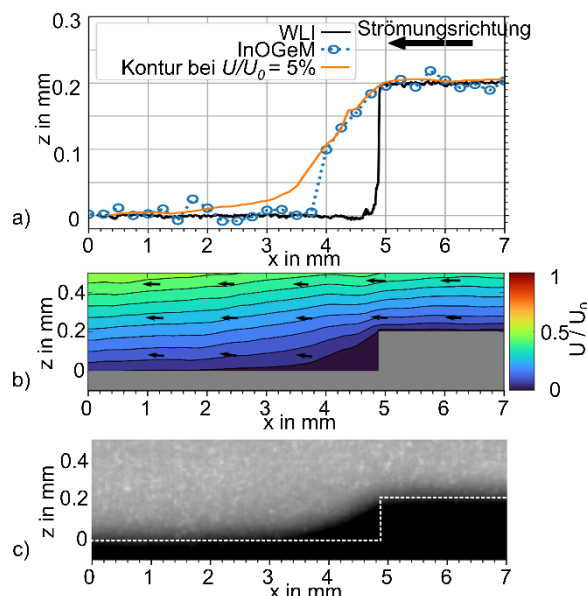


Abb. 6: Analyse des InOGeM-Ansatzes und der Strömung auf einer Stufengeometrie: a) Gemessenes Höhenprofil und 5%-Geschwindigkeitskonturlinie, b) zeitlich gemittelttes 2d-Strömungsfeld, c) PIV-Bild der Partikelfluoreszenzintensität [16].

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Ziel dieses Beitrags war es, ein neuartiges und materialunabhängiges indirektes optisches Geometriemessverfahren vorzustellen, das auf dem Prinzip der Messung eines Aerosolstroms aus fluoreszierenden Mikrosonden beruht.

Um die universelle Anwendbarkeit auf Objekte aus unterschiedlichen Materialien zu zeigen, wurden hierzu 100 µm hohe Stufegeometrien aus Messing, PMMA, PE, und PTFE gemessen und mit weißlichtinterferometrischen Referenzmessungen verglichen. Auch wenn die gemessenen Rauheiten der Oberflächen aufgrund des aktuell noch relativ großen konfokalen Volumens von 30 µm deutlich über denen der Referenzmessung liegen, stimmen die berechneten Stufenhöhen im Rahmen der Messunsicherheiten von unter 5 µm mit denen der Referenzmessung überein.

Im Gegensatz zu den WLI-Referenzmessungen bei denen an der 100 µm hohen Stufe insbesondere bei der schwarzen PMMA-Probe „batwings“ von über 30 µm auftraten, ist dieses Phänomen bei der indirekten Geometriemessung nicht zu beobachten. Die Untersuchungen stützen also die These, dass weder steile Oberflächengeometrien noch die Materialeigenschaften des Messobjekts einen Einfluss auf die indirekte Messung besitzen.

Ein noch offenes Defizit wird durch die Particle Image Velocimetrie aufgezeigt. Offensichtlich folgt bei den gewählten Anströmbedingungen unter 30° und einer Sondengeschwindigkeit von 1 m/s die Partikel nicht exakt der Oberfläche, wodurch Abweichungen entstehen. Weitere Forschungsanstrengungen sollten sich daher auf die Wahl geeigneter Anströmbedingungen fokussieren, wobei das Fernziel der laufenden Arbeiten in dem Übergang zu einer fluoreszierenden Umgebungsatmosphäre besteht.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Europäischen Forschungsrats (ERC) für das Projekt 101044046-InOGem („Indirect Optical Geometry Measurement“) im Rahmen eines Consolidator Grant.



Funded by
the European Union



European Research Council
Established by the European Commission

Literatur

- [1] Baryshev, S., Erck, R., Moore, J., Zinovev, A., Tripa C., Vervovkin, I., 2013: „Characterization of Surface Modifications by White Light Interferometry: Applications in Ion Sputtering, Laser Ablation, and Tribology Experiments“, J. Vis. Exp. (72), p. e50260
- [2] Lewke, D. et al., 2013: „Full wafer nanotopography analysis on rough surfaces using stitched white light interferometry images“, ASMC 2013 SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 243-248
- [3] Riebeling, J., Lehmann, P., Laubach S., Ehret, G., 2017: „Combination of a fast white light interferometer with a phase-shifting interferometric line sensor for form measurements of precision components“, Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium
- [4] Lehmann, P., et al., 2016: „Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry“.Surf. Topogr.: Metrol. Prop. 4 024004
- [7] Elliott, A. D., 2020: „Confocal microscopy: Principles and modern practices“, Current Protocols in Cytometry, 92, e68
- [8] LIU, J., LIU, C., TAN, J., YANG, B., WILSON, T., 2016: „Super-aperture metrology: overcoming a fundamental limit in imaging smooth highly curved surfaces“, Journal of Microscopy, 261: 300-306
- [11] Mikulewitsch, M., Freyberg, A.v., Fischer, A., 2019: „Confocal fluorescence microscopy for geometry parameter measurements of submerged micro-structures“, Opt. Lett. 44, 1237-1240
- [12] Fischer, A., Mikulewitsch, M., Stöbener, D., 2020: „Indirect fluorescence-based in situ geometry measurement for laser chemical machining“, CIRP Annals - Manufacturing Technology 69(1):481-484
- [13] Takaya, Y., Maruno, K., Michihata, M., Mizutani, Y., 2016: „Measurement of a tool wear profile using confocal fluorescence microscopy of the cutting fluid layer“, CIRP Annals 65(1), 467-470
- [14] ISO committee, 2019: „Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method; Measurement standards — Part 1: Material measures“, ISO 5436-1:2000
- [15] Wyant, J., Harasaki, A., 2000: „Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry“, Appl. Opt. 39, 2101-2106
- [16] Feld, B., Gebken, J., Tausendfreund, A., Fischer, A., 2024: „Indirect optical geometry measurements with a stream of particles as micro probes“, Optics and Lasers in Engineering (in review)