

Wenn Strömung und Oberfläche aufeinandertreffen – ein neues Paradigma zur Messung von Mikrogeometrien

When flow meets surface - a new paradigm for measuring microgeometries

Björn Espenhahn¹, Gert Behrends¹, Andreas Tausendfreund¹, Andreas Fischer^{1,2}

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

² Universität Bremen, MAPEX Center for Materials and Processes, Postfach 330440, 28359 Bremen

Strömungsdynamik, PIV, Geometriemessung, Fluoreszenz-Mikroskopie
flow dynamics, PIV, geometry measurement, fluorescence microscopy

Zusammenfassung

Die präzise Fertigung von mikrostrukturierten Bauteilen aus zunehmend unterschiedlichen Geometrien und Materialien erfordert immer präzisere und vielfältig einsetzbare Geometriemessverfahren. Heutige optische Messansätze ermöglichen prinzipiell hochpräzise geometrische Messungen, sind aber auf kooperative Oberflächen angewiesen. D.h. die optische Antwort der Oberfläche ist entscheidend für den Messerfolg. Um diese Abhängigkeit der Oberfläche zu umgehen, stellen wir den universell nutzbaren Ansatz der indirekten optischen Geometriemessung vor. Hierbei wird die Fluidumgebung des Messobjekts erfasst, d.h. dessen Abdruck im Fluid. Dazu wird das umgebende Medium mit einem Fluoreszenzfarbstoff angereichert und mit einem konfokalen Fluoreszenzmikroskop der Raum um das Messobjekt gescannt. Im Ergebnis hängt das optische Antwortverhalten nicht vom Objekt ab, sondern von der An- bzw. Abwesenheit des Fluoreszenzfarbstoffs. Während dieser Ansatz bereits in einer flüssigen Umgebung angewandt wurde, zeigt diese Arbeit erstmals die Machbarkeit von indirekten optischen Geometriemessungen in Luftumgebungen mit fluoreszierenden Aerosolen. Die modellbasierte Auswertung zur Bestimmung der Oberflächenposition wird um den Einfluss der wandnahen Strömung an flachen Geometrien erweitert und mit dem bereits vorhandenen Ansatz für Messungen in Flüssigkeiten verglichen. Messungen belegen die durch die Modellerweiterung erreichte Reduzierung der systematischen Messabweichung von 16 µm auf, die durch eine Erweiterung des Modells auf 2 µm reduziert werden konnten. Somit konnte erstmals die Machbarkeit einer indirekten optischen Geometriemessung bei einer Luftumgebung mit fluoreszierenden Aerosolen mit µm-Auflösung demonstriert werden.

Einleitung

Die zunehmenden Anforderungen an die Fertigung von Mikrogeometrien erfordern schnelle Geometriemesssysteme mit einer höheren Präzision, als sie für die Fertigung selbst erforderlich ist. Optische Systeme ermöglichen berührungslose, nicht-invasive Messungen mit der schnellstmöglichen Geschwindigkeit, d.h. der Lichtgeschwindigkeit. Im Prinzip nur durch die Gesetze der Quantenmechanik begrenzt, kann mit optischen Systemen eine herausragende Präzision und Genauigkeit erreicht werden. Die zunehmende Vielfalt der Werkstoffe (Metall, Glas, Keramik, Faserverbundwerkstoffe, Kunststoffe) erfordert jedoch eine robuste messtechnische Lösung, die auf jeder Oberfläche funktioniert, d. h. auf Oberflächen mit unterschiedlichen optischen Streueigenschaften aufgrund der Oberflächenrauheit sowie des Reflexions- und Transmissionsvermögens des Materials. Konventionelle Messtechniken werden entsprechend der Anforderungen, sowie der "Kooperationsfähigkeit" der Oberfläche mit dem Licht ausgewählt. Die optische Messung der Geometrie

eines additiv gefertigten Teils einer Brennstoffzelle ist ein aktuelles Beispiel, bei der während der Herstellung eine präzise Oberflächenmessung aufgrund der geringen und variierenden Oberflächenstreuung eine Herausforderung ist. Um die steigende Vielfalt an Messobjektformen, -oberflächen und -materialien mit einem einzigen Messverfahren zu beherrschen, müssen die Grenzen der derzeitigen optischen Geometriemessungen überschritten werden. Es ist ein grundlegend neues Messparadigma erforderlich, die indirekte Geometriemessung (InOGeM).

Es besteht kein Zweifel, dass es bereits optische Geometriemessverfahren gibt, die sowohl schnell als auch präzise sein können. Die dem Stand der Technik zugrundeliegenden Prinzipien basieren auf Triangulation, einschließlich Streifenprojektion und Deflektometrie (Schwenke et al., 2002) sowie Lichtfeldansätzen (Neri et al., 2019), Time-of-flight (Trocha et al., 2018), Interferometrie (Yang und Zhang, 2018) sowie konfokalen Techniken (Berkovic und Shafir, 2012). Die meisten dieser Techniken sind in der Lage, Auflösungen im Nanometerbereich zu erreichen, und einige erlauben maximale Messraten von bis zu 100 Millionen Punkten pro Sekunde (Trocha et al., 2018). Dies ist jedoch nur unter idealen Messbedingungen mit ausreichend hoher Streulichtintensität von der Oberfläche gültig. Wird kein gestreutes oder reflektiertes Licht erkannt, ist keine Messung möglich.

Das oft unkooperative Streuverhalten der Oberflächen begrenzt die erreichbare Messgeschwindigkeit und Messgüte. Um diesen Umstand zu revolutionieren, stellen wir eine universell einsetzbaren Messansatz unabhängig von den optischen Eigenschaften der Oberfläche vor: die indirekte optische Geometriemessung (InOGeM). Entgegen der klassischen Messverfahren wird bei InOGeM nicht die Geometrie des Messobjekts erfasst, sondern zunächst die des Objekt umgebenden Fluids, sodass die Oberflächenposition dann indirekt aus dem Abdruck der optischen Antwort des Fluids folgt. Dieser Ansatz kam bei der laserchemischen Materialverarbeitung bereits zur Anwendung, wofür das Säurebad, in dem das Bauteil getaucht ist, mit fluoreszierenden Molekülen angereichert wurde (Fischer et al., 2020). Auch wenn dieser Ansatz vielversprechend ist, kann nicht jedes Werkstück in eine Flüssigkeit eingetaucht werden.

Aus diesem Grund soll das umgebende Fluid gegen ein Gas ausgetauscht werden, wobei zunächst eine Übertragbarkeit des Ansatzes für Aerosole untersucht werden muss. Das Prinzip der indirekten Geometriemessung beruht auf der Beobachtung der Fluoreszenzintensität, wobei ein Übergang abnehmender Intensitäten das Ende der fluoreszierenden Atmosphäre und damit den Beginn der Oberfläche beschreibt. Die tatsächliche Position der Oberfläche zu finden ist das zu lösende inverse Problem. Um die Position der Oberfläche aus dem Intensitätssignal zu bestimmen, ist ein Signalmodell erforderlich. Der nicht-diskrete Intensitätsverlauf in Wandnähe hängt dabei maßgeblich von der fluoreszierenden Atmosphäre sowie dem konfokalen Volumen ab. Entgegen der homogenen Verteilung in Flüssigkeiten ist für das Aerosol eine inhomogene Verteilung zu erwarten, die zusätzlich zu den erwartbaren Strömungsgradienten in Wandnähe berücksichtigt werden muss (Kähler et al., 2012).

Das Ziel des vorliegenden Beitrages ist daher die Herleitung eines Signalmodells für die indirekte optische Geometriemessung, welches das Aerosolverhalten nahe der Oberfläche berücksichtigt. Damit sollen die Machbarkeit und die Fähigkeiten der indirekten optischen Geometriemessung in einer gasförmigen Umgebung demonstriert und systematische Messabweichungen minimiert werden.

Lösungsansatz

Betrachtet wird die Messung der Oberflächentopographie basierend auf der Intensitätsantwort eines fluoreszierenden Umgebungsmediums. Das grundlegende Messprinzip basiert auf der konfokalen Fluoreszenzmikroskopie, wie es in Abb. 1 a dargestellt ist. Dieses Messverfahren ermöglicht eine punktweise Messung der Fluoreszenzintensität in einem Detektionsvolumen, das räumlich auf ein Gebiet um den Fokus des optischen

Systems begrenzt ist. Die Oberflächenposition wird dabei durch einen Scan entlang der Höhe z bestimmt. Eine Zunahme der Fluoreszenzintensität beim Übergang zwischen Messobjekt und fluoreszierender Messumgebung definiert hierbei den Punkt z_0 der Oberfläche. Die fluoreszierende Messumgebung wird durch die Verwendung von einem flüssigen Aerosol erzeugt, welches mit einer auf die Oberfläche gerichteten Düsenströmung dem Messvolumen zugeführt wird.

Für die Bestimmung der Oberflächenposition z_0 wird das Intensitätssignal der Fluoreszenz $I_F(z)$ aufgezeichnet und modellbasiert ausgewertet. Das Fluoreszenzintensitätssignal wird maßgeblich von zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen durch die effektive Anregungsintensitätsverteilung $I(r, z)$ im konfokalen Volumen (worin hier die örtlich-verteilte Beobachtungsempfindlichkeit mitberücksichtigt wird), zum anderen durch den mittleren Fluoreszenzwirkgrad $\xi(z)$ der mit dem Aerosol angereicherten Luft an der axialen Position z . Während sich das Messobjekt ruht, wird das konfokale Volumen in z -Richtung bewegt. Die resultierende Detektorintensität ergibt sich somit aus der z -abhängigen Faltung:

$$I_F(z) = \xi(z) * \int_{-\infty}^{\infty} I(r, z) dr. \quad (1)$$

Für eine Oberflächenbestimmung in Flüssigkeiten kann eine homogene Konzentration des Fluoreszenzfarbstoffs angenommen werden und die Strömungsgeschwindigkeit geht nicht in $\xi(z)$ ein, wodurch $\xi(z)$ in der Flüssigkeit konstant ist und sich die Fluoreszenzintensität mit einer Error-Funktion approximieren lässt (Fischer et al., 2020).

Zur Beschreibung der Beobachtung an einer Strömung mit Aerosolen muss die Gewichtungsfunktion angepasst werden, insbesondere um den Einfluss der inhomogenen Verteilung des Fluoreszenzfarbstoffs, sowie Geschwindigkeit der (das konfokale Volumen passierenden) Aerosolteilchen zu berücksichtigen. Entgegen den Messungen in Flüssigkeiten wird bei der Verwendung eines Aerosols nur dann eine Intensität detektiert, wenn Aerosolpartikel das konfokale Volumen passieren. Die Fluoreszenzintensität ist dabei abhängig von der Konzentration, Geschwindigkeit oder Größe der Partikel. Das konfokale Volumen ist kleiner als die mittlere Partikelgröße, weshalb kein kontinuierliches Fluoreszenzsignal zu erwarten ist. Stattdessen lässt sich aus den in der Messzeit t gezählten Pulsen im Fluoreszenzsignal unmittelbar auf die Partikelanzahl $N_F(z)$ schließen, die das konfokale Volumen passiert haben. Aus der so gemessenen Partikelrate $\dot{N}_F(z)$ in Abhängigkeit der Scanposition z wird nun die Oberflächenposition z_0 bestimmt. Zur Modellierung dieses Signals wird in Anlehnung an Gl. 1 der Ansatz

$$\dot{N}_F(z) \sim \xi(z) * \int_{-\infty}^{\infty} I(r, z) dr \quad (2)$$

gewählt, wobei über $\xi(z)$ hier die Abhängigkeit von der Partikelkonzentration $\lambda(z)$ und der Geschwindigkeit $U(z)$ mit beschreibt, d.h.

$$\xi(z) \sim U(z) \cdot \lambda(z). \quad (3)$$

Zur Beschreibung der Geschwindigkeit $U(z)$ wird die Strömung in Objektnähe als Grenzschichtströmung an einer ebenen Platte angenommen, welche mit einer analytischen Näherung nach Savaş (2012) durch

$$U(z) \approx \gamma \cdot (\tanh [(\alpha \cdot \nu \cdot z)^n])^{1/n}, \quad (4)$$

mit $\alpha = 0.33245$ und $n = 5/3$ approximiert wird. Die Parameter γ und ν werden als freie Parameter für die Kurvenanpassung verwendet. Zudem wird zunächst die stark vereinfachte Annahme einer konstanten Partikelkonzentration getroffen. Aus den Gleichungen 2,3,4 und für eine zweidimensionale gaußförmige Anregungsintensitätsverteilung (die die Beobachtungsempfindlichkeit einschließt), ergibt sich somit für die de-

tektierte Partikelrate das Signalmodell

$$\dot{N}_F(z) \sim \int_{z_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma \cdot (\tanh [(\alpha \cdot \nu \cdot (\tilde{z} - z_0))^n])^{1/n} \cdot e^{-\frac{2}{\omega_0^2} \left(r^2 - \frac{(z - \tilde{z})^2}{\kappa^2} \right)} dr d\tilde{z}. \quad (5)$$

Zur Bestimmung der Oberfläche wird Gl. 5 an das gemessene Signal $\dot{N}_F(z)$ gefittet und so die Oberflächenposition z_0 numerisch ermittelt.

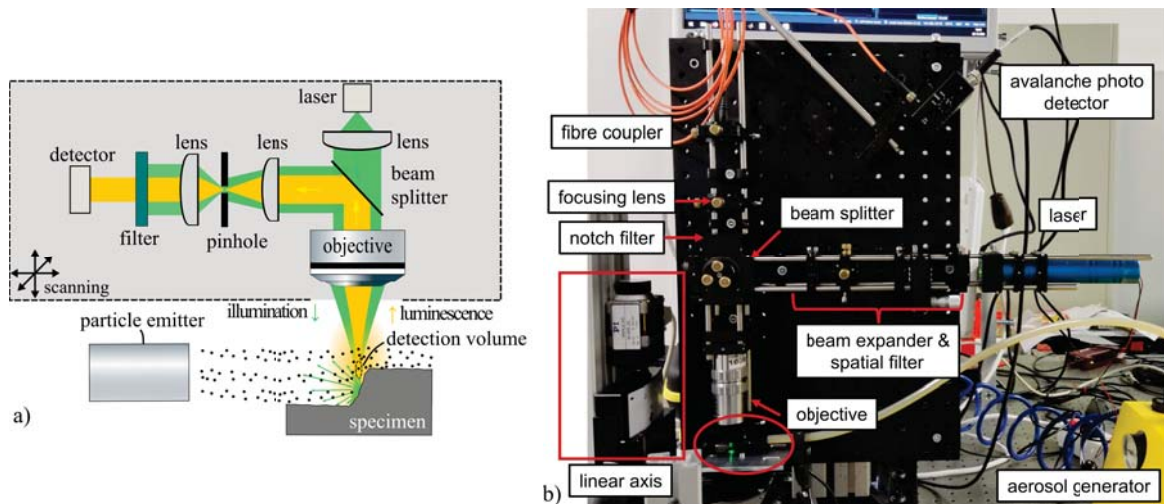


Abb. 1: Schematischer und experimenteller Aufbau der indirekten Geometriemessung. a) Prinzip der indirekten optischen Geometriemessung unter Verwendung eines konfokalen Fluoreszenzmikroskops. b) Verwendeter Experimenteller Aufbau.

Versuchsaufbau und -durchführung

Gemäß dem Paradigma der optischen indirekten Geometriemessung wird mit einem Konfokalmikroskop die Intensität der angeregten fluoreszierenden Atmosphäre scannend erfasst. Abb. 1 b zeigt den Versuchsaufbau der Labormessung. Die fluoreszierende Atmosphäre wird durch ein DEHS-Aerosol erzeugt, in dem 1.6 g/L des Fluoreszenzfarbstoffs Pyrromethene 567 aufgelöst ist. Die Partikel haben eine mittlere Partikelgröße von 0.6 μm und werden mit dem Aerosolgenerator ATM 210 von Topas erzeugt und über einen Schlauch mit einer Auslassöffnung von 6 mm als Freistrahle auf das Messobjekt gerichtet.

Der Anregungslaser von Edmund Optics (532 nm, 50 mW) wird über einen Strahlteiler in das unendlich korrigierten Objektiv Optem Plan Apo 20X von Qioptiq eingekoppelt. Das konfokale Volumen hat hierbei eine Auflösung von 35 $\mu\text{m} \times 8.5 \mu\text{m}$ in axialer und radialer Ausdehnung. Das Fluoreszenzantwortsignal wird über den Notch-Filter ((532 \pm 17) nm) und die Multimode-Faser an den Avalanche-Photodetektor APD440A2 von Thorlabs weitergeleitet. Die Schrittweite der Lineareinheiten von PI beträgt 1 μm in der z -Richtung und 100 μm in $x - y$ -Richtung.

Das Fluoreszenzsignal der Avalanche-Fotodiode wird mit einer Abtastfrequenz von 25 000 kHz aufgenommen. Für die Detektion der Partikel, wird eine auf 1000 Werte gefensterter Outlier-detection nach Grubbs (1969) durchgeführt.

Charakterisierung der oberflächennahen Zuströmung des Aerosols

Zur Charakterisierung der Zuströmung des Aerosols werden PIV-Messungen durchgeführt. Die Beleuchtung wird mit einem gepulsten Nd:YAG-Doppelpuls-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm mit maximaler Energie pro Puls von 200 mJ und einer Pulslänge von 10 ns des Typs Evergreen der Firma Quantel realisiert. Für die Aufnahmen wird eine Andor Zyla 5.5 Mpx sCMOS-Kamera mit einem 100 mm Makro-Objektiv verwendet. Messungen mit einem Abstand von 300 mm zur Messebene resultieren in Aufnahmen mit einer räumlichen Auflösung von $6 \mu\text{m}/\text{px}$. Das Geschwindigkeitsfeld wird mit Auswertefenstern von $16 \text{ px} \times 32 \text{ px}$ mit der Software DynamicStudio 7.6 von Dantec Dynamics ausgewertet, was in einer räumlichen Auflösung von $96 \mu\text{m} \times 192 \mu\text{m}$ resultiert.

In Abb. 2 ist im oberen Teil eine Rohbildaufnahme der Fluoreszenz-Intensität der Düsenströmung für die Freistrahlanordnung (d.h. ohne Oberfläche) dargestellt. Im unteren Teil die zugehörige gemittelte Geschwindigkeit der x -Komponente des Geschwindigkeitsfeldes. Das Geschwindigkeitsfeld zeigt eine stabile Strömung mit einer Kernstrahlgeschwindigkeit von 3.5 m/s für eine Distanz bis etwa 30 mm, ehe der Strahl aufbricht. Um den Einfluss von Turbulenzen zu minimieren, wird nur der Bereich von 10 mm bis 30 mm der Anströmung verwendet. Um die Interaktion mit der Oberfläche möglichst gering zu halten, wird die Zufuhrströmung parallel zur Oberflächengeometrie ausgerichtet, wobei die Düsenöffnung auf der Höhe der Oberfläche positioniert ist.

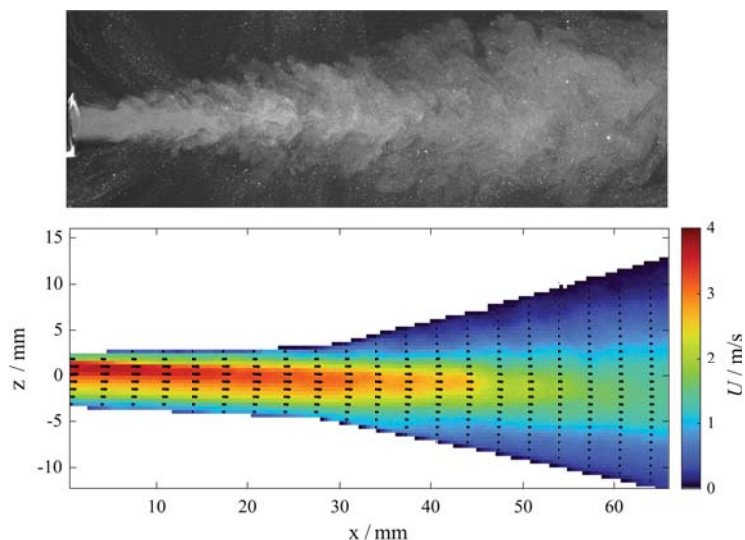


Abb. 2: Darstellung der Anströmung und zugehöriges gemitteltes Geschwindigkeitsfeld.

In Abb. 3 sind die Fluoreszenzintensitäten der PIV-Rohbildaufnahmen, sowie das resultierende gemittelte Geschwindigkeitsfeld an einer Stufengeometrie dargestellt. Das Strömungsprofil nahe der Oberfläche ist signifikant durch die Anströmung, d.h. durch das Geschwindigkeitsprofil der Düsenströmung geprägt, was anhand des vergleichbaren Verlaufs ersichtlich wird. Darüber hinausgehend wird vermutet, dass die Dicke der Grenzschicht unterhalb der räumlichen Auflösung von $96 \mu\text{m}$ liegt, und die Anwendbarkeit von Gl. 5 noch zu prüfen ist.

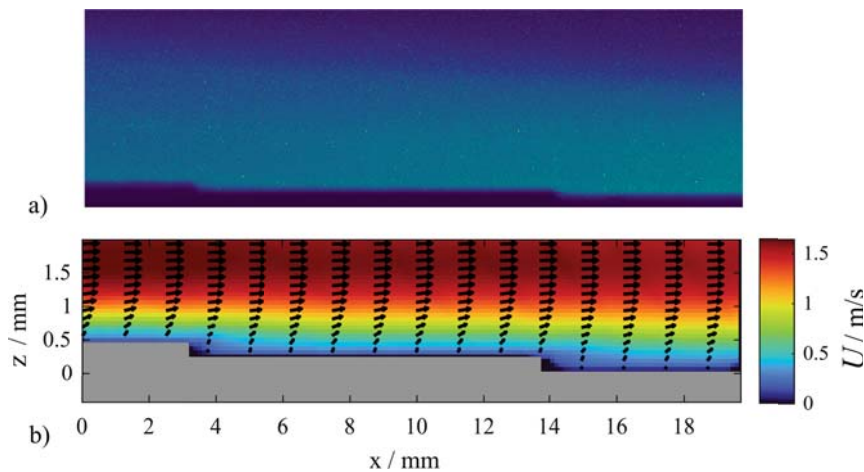


Abb. 3: a) Gemittelte Intensitäten der Rohbildaufnahmen, b) Geschwindigkeitsfeld an einer Stufengeometrie (Messobjekt).

Ergebnisse der indirekten Messung der Oberflächenposition

Um den Ansatz der indirekten optischen Geometriemessung mit der Verwendung von Aerosolen zu erproben, werden im Folgenden die Messsignale und die daraus ermittelten Oberflächenpositionen z_0 aus dem bisherigen symmetrischen Signalmodell einer gaußschen Fehlerfunktion nach (Fischer et al., 2020) und nach dem neuen Signalmodell aus Gl. 5 dargestellt und verglichen. In Abb. 4 ist die gemittelte Intensität (oben) sowie die Partikelrate $\dot{N}_F(z)$ (unten) über der Scanposition aufgetragen. Zur Verifizierung der Oberflächenposition ist eine schwache Kontamination mit einem Fluoreszenzfarbstoff auf die Probe aufgetragen, womit eine Referenzposition $z_{0,ref} = 9.827$ mm aus dem Maximum des Intensitätssignals ermittelt wird. Anhand des Referenzwertes können die indirekt ermittelten Oberflächenpositionen verifiziert werden.

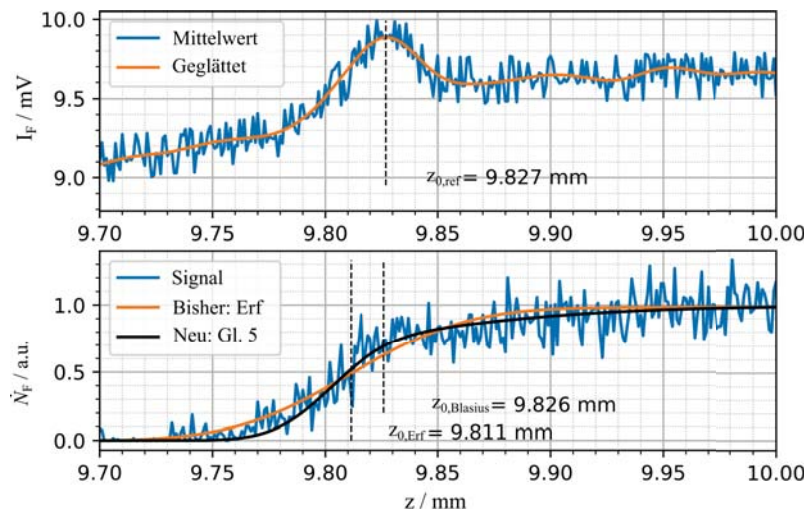


Abb. 4: Oben: Gemitteltes Signal der Fluoreszenzintensität $I_F(z)$ über der Scanposition z , mit markierter Referenzposition. Unten: Partikelrate $\dot{N}_F(z)$ in Abhängigkeit von z .

Für die indirekte Bestimmung der Oberflächenposition wird die Partikelrate $\dot{N}_F(z)$ verwendet (Abb. 4 unten). Der Verlauf von $\dot{N}_F(z)$ weist zwei signifikante Bereiche auf. Der erste Bereich geht von $9.70 \text{ mm} \leq z \lesssim$

9.825 mm und weist einen näherungsweise exponentiellen Anstieg auf. Dieser Bereich entspricht dem Verlauf wie es durch das konfokale Volumen zu erwarten ist. Der zweite Bereich von 9.825 mm $\lesssim z \leq 10.00$ mm hat einen eher wurzelförmigen, langsam anwachsenden Verlauf. Für die indirekte Geometriebestimmung erfolgt eine Anpassung der Modellfunktionen an die Messwerte. Für den Modellansatz nach Fischer et al. (2020) (orange Linie), welcher das Strömungsverhalten nicht berücksichtigt, ergibt sich eine Messabweichung $z_{0,\text{Erf}} - z_{0,\text{ref}} = 16 \mu\text{m}$ und die angepasste Modellfunktion weicht von dem Messsignal ab. Die Messdaten zeigen ab $z \geq 9.825$ mm einen durch die Grenzschichtströmung veränderten Verlauf, welches in dem Modell nicht berücksichtigt wird. Mit dem hier vorgestellten Modellansatz gemäß Gl. 5 (schwarze Linie) verbleibt lediglich eine Messabweichung $z_{0,\text{Blasius}} - z_{0,\text{ref}}$ von $1 \mu\text{m}$. Außerdem zeigt die angepasste Modellfunktion eine geringere Abweichungen vom Messsignal.

Um den Einfluss der Grenzschicht auf den Messansatz und die Notwendigkeit der Auswertung der Partikelrate $\dot{N}_F(z)$ aufzuzeigen, sind in Abb. 5 die Ergebnisse der Messung an einer Geometrie ohne Referenzmarkierung dargestellt. Die Oberflächenposition $z_{0,\text{ref}} = 18.200$ mm wurde mit einer Referenzmessung bestimmt. Entgegen der vorherigen Messung ist die Intensität monoton ansteigend, sodass keine Oberflächenposition direkt ermittelt werden kann. Der Verlauf von $\dot{N}_F(z)$ ist ähnlich im Vergleich zur vorherigen Messung, wobei dieser weniger stark durch die Grenzschichtströmung beeinflusst ist. Dies führt dazu, dass das Signal näherungsweise symmetrisch um den Wendepunkt $z \approx 18.200$ mm ist. Aus der indirekten Oberflächenbestimmung ergeben sich die Oberflächenpositionen $z_{0,\text{Erf}} = 18.198$ mm nach dem Signalmodell von (Fischer et al., 2020) und $z_{0,\text{Blasius}} = 18.202$ mm nach Gl. 5, welche jeweils eine Abweichung von $2 \mu\text{m}$ zum Referenzwert haben. Für die dargestellte Messung ist der Einfluss der Grenzschichtströmung somit nicht signifikant.

Resümierend verursacht die Interaktion der Strömung am Messobjekt eine systematische Messabweichung. Durch eine Erweiterung des Signalmodells unter Berücksichtigung von Geschwindigkeit und Konzentration der Aerosolpartikel kann dieser systematische Einfluss kompensiert werden.

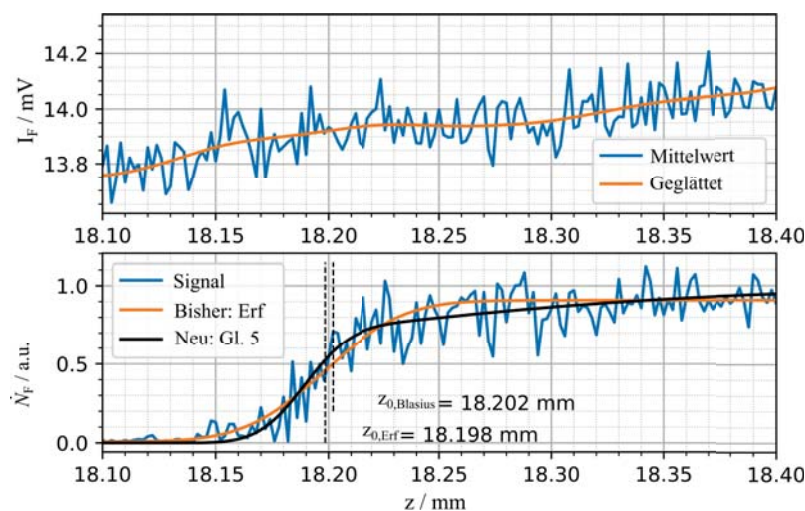


Abb. 5: Oben: Gemitteltes Signal der Fluoreszenzintensität über die Scanposition z . Unten: Partikelrate $\dot{N}_F(z)$ in Abhängigkeit von z .

Zusammenfassung und Ausblick

In den ersten Ansätzen zur indirekten optischen Geometriemessung wurden Flüssigkeiten verwendet, welche den Einfluss einer Strömung nicht berücksichtigen. Die hier vorgestellte Arbeit erweitert das Signalmodell um den Einfluss der Grenzschichtströmung und einer inhomogenen Verteilung der Konzentration des

Fluoreszenzfarbstoffs, um eine indirekte Oberflächenmessung durch Verwendung eines fluoreszierenden Aerosols zu ermöglichen. Insbesondere wird hierbei die beobachtbare Partikelrate des konfokalen Systems entsprechend der Grenzschichttheorie abgeschätzt. Ein experimenteller Vergleich der Ergebnisse mit dem bisherigen und dem um den Strömungseinfluss erweiterten Signalmodell sowie der Abgleich mit einer Referenzmessung bestätigen die Anwendbarkeit des erweiterten Signalmodells. Außerdem bezeugen sie den Einfluss der Grenzschichtströmung, den es zu berücksichtigen und kompensieren gilt.

Um die erreichbare Messunsicherheit zu minimieren, müssen in einem nächsten Schritt die technischen Details der Partikelzuführung, die Homogenisierung der Partikelgröße und der Einfluss von Kontamination ausgearbeitet werden. Ebenso bietet die aktuell gewählte Ausdehnung des konfokalen Volumens im einstelligen μm -Bereich noch Optimierungspotenzial, um Datenrate und somit die Messauflösung zu steigern. Langfristig soll, zur vollständigen Überwindung der mit der Nutzung von Partikeln stets einhergehenden Herausforderungen, an der Messung mit fluoreszierenden Gasen wie CO_2 geforscht werden. Noch werden bei der Herstellung von hochpräzisen Mikrobautteilen oder mikrostrukturierten Oberflächen je nach Prozess speziell angepasster komplexer Verfahren zur In-Prozess-Messung und Qualitätsprüfung eingesetzt. Die konfokale Fluoreszenzmikroskopie bietet das zu erforschende Potenzial, diese Vielzahl erforderlicher Verfahren zu reduzieren, eine Anwendung auch auf optisch unkooperativen Materialien zu ermöglichen, und damit die optische indirekte Geometriemessung als universell einsetzbare Messmethode in Zukunft zu etablieren.

Dankesworte

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

Literatur

- Berkovic, G., Shafir, E., 2012:** "Optical methods for distance and displacement measurements", *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 4, No. 4 p. 441, ISSN 1943-8206, doi:10.1364/AOP.4.000441
- Fischer, A., Mikulewitsch, M., Stöbener, D., 2020:** "Indirect fluorescence-based in situ geometry measurement for laser chemical machining", *CIRP Annals*, Vol. 69, No. 1 pp. 481–484, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2020.03.018
- Grubbs, F. E., 1969:** "Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples", *Technometrics*, Vol. 11, No. 1 pp. 1–21, ISSN 0040-1706, doi:10.1080/00401706.1969.10490657
- Kähler, C. J., Scharnowski, S., Cierpka, C., 2012:** "On the uncertainty of digital PIV and PTV near walls", *Experiments in Fluids*, Vol. 52, No. 6 pp. 1641–1656, ISSN 0723-4864, doi:10.1007/s00348-012-1307-3
- Neri, A., Carli, M., Battisti, F., 2019:** "A Maximum Likelihood Approach for Depth Field Estimation Based on Epipolar Plane Images", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 28, No. 2 pp. 827–840, ISSN 1941-0042, doi:10.1109/TIP.2018.2871753
- Savaş, Ö., 2012:** "An approximate compact analytical expression for the Blasius velocity profile", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 17, No. 10 pp. 3772–3775, ISSN 10075704, doi:10.1016/j.cnsns.2012.02.002
- Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., Kunzmann, H., 2002:** "Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering", *CIRP Annals*, Vol. 51, No. 2 pp. 685–699, ISSN 00078506, doi:10.1016/S0007-8506(07)61707-7
- Trocha, P., Karpov, M., Ganin, D., Pfeiffer, M. H. P., Kordts, A., Wolf, S., Krockenberger, J., Marin-Palomo, P., Weimann, C., Randel, S., Freude, W., Kippenberg, T. J., Koos, C., 2018:** "Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs", *Science (New York, N.Y.)*, Vol. 359, No. 6378 pp. 887–891, ISSN 1095-9203, doi:10.1126/science.aao3924
- Yang, S., Zhang, G., 2018:** "A review of interferometry for geometric measurement", *Measurement Science and Technology*, Vol. 29, No. 10 p. 102001, ISSN 0957-0233, doi:10.1088/1361-6501/aad732