

Speckleverfahren zur absoluten Abstandsmessung

V 436-26

Speckle techniques for absolute distance measurement

G. E. Hege und H. J. Tiziani

Schlagwörter: Berührungslose Abstandsmessung, raue Oberflächen, Laserspeckles

Eine ausführliche Untersuchung möglicher Speckleverfahren zur absoluten Abstandsmessung von rauhen Oberflächen hat gezeigt, daß eine axiale Auflösung im Submikrometerbereich nur durch Auswerten der lateralen Specklegeschwindigkeit möglich ist. Hierzu wird bei ruhendem Objekt ein fokussierter Laserstrahl akustooptisch um 0,2 mm periodisch ausgelenkt. Die entstehende Specklebewegung wird von einem Gittersensor erfaßt und von einem Zählprozessor bewertet. Die erreichte Auflösung bezogen auf einen freien Arbeitsabstand von 35 mm beträgt 3×10^{-5} bei einem Meßbereich von $\pm 0,2$ mm bis $\pm 1,5$ mm.

A thorough treatment of possible speckle techniques for absolute distance measurement has shown that submicrometer resolution or even accuracy is achievable only by measuring lateral speckle velocity. The object being at rest lateral excursions of the focused laser beam need to be only 0.2 mm and are obtained by means of a fast and solid state acousto-optic deflector. The resulting speckle motion is detected by a differential phase grating sensor and measured by a counter processor. The resolution as to the free working distance of the scan optics (35 mm) comes to about 3×10^{-5} , the measuring range being ± 0.2 mm to ± 1.5 mm.

1 Einleitung

Die berührungslose optische Abstandsmessung einer Werkstückoberfläche bezüglich eines Tastkopfes bedingt Meßverfahren mit eindeutiger absoluter Meßwertanzeige. Bisher eingesetzte Meßverfahren basieren auf der Interferometrie, der Moiré-Technik oder der Triangulation. Weiter werden eingesetzt einfache astigmatische und dispersive Fokussierverfahren sowie das Lichtwaagenprinzip. Die Technik der Laserspeckles bietet eine interessante Alternative. Ursprünglich als Schmutz- oder Rauschefeekt bekämpft, erkannte man jedoch bald den eindeutigen Zusammenhang zwischen Oberflächenstrukturen und Speckles (auch Granulation).

Zwei wesentliche Speckle-Effekte stehen zur Verfügung für die Bestimmung der Lage einer rauhen Oberfläche zum Fokus eines Laserstrahles: (1) Laterale Ausdehnung der Speckles (Specklegröße) und (2) laterale Bewegung der Speckles infolge einer lateralen Relativbewegung zwischen fokussiertem Laserstrahl und angetasteter Oberfläche.

Abstandsmessungen durch Auswerten der fokusabhängigen Specklegrößenänderung sind z. B. in [1] beschrieben. Erreicht wird eine axiale Auflösung von 10 µm bei einer Meßunsicherheit von 50 µm und einem Meßbereich von ± 1 mm. Erste Versuche zur Bestimmung einer fokusabhängigen Specklebewegung bei kleiner lateraler Relativbewegung zwischen fokussiertem Laserstrahl und rauher Oberfläche findet man in [2] ohne Angabe erreichter Leistungsdaten. Eine Schaltung zur Auswertung der Specklegeschwindigkeit als Funktion von Geschwindigkeit und Fokusabstand einer Oberfläche wird in [3] angegeben. Die Signale von zwei versetzt angeordneten Fotodioden werden elektronisch kreuzkorreliert zur Ermittlung der Zeit, die ein Speckle von einer Fotodiode zur anderen benötigt. Für axiale Auflösungen von 2 µm werden jedoch Tastwege von mindestens 2 m erforderlich, der Meßbereich beträgt $\pm 0,5$ mm bis $\pm 1,5$ mm. Ähnliche Tastversuche finden sich bereits in [4] und [5], allerdings ohne Angabe von Leistungsdaten. Die wenig effiziente Ausnutzung der rückgestreuten Laserstrahlung durch lediglich zwei kleine Fotodioden wird in einem weiteren Experiment [6] durch Einsatz eines Amplitudengitters mit Feldlinse und Fotodiode verbessert. Vergleichbare Angaben über erreichte Leistungsdaten fehlen allerdings. Eine spezielle Anwendung der Abstandsmessung mit Laserspeckles und Faseroptik wird in [7] beschrieben.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das durch Auswertung der Specklegeschwindigkeit axiale Abstandsauflösungen von angetasteten rauhen Oberflächen ≤ 1 µm ermöglicht. Mit einem typischen Tastweg von 0,2 mm auf der Werkstückoberfläche wird erstmals auch eine praxistaugliche laterale Auflösung verwirklicht [8].

2 Speckle-Entstehung

Wird eine optisch raue Oberfläche mit Laserlicht beleuchtet, so zeigt das reflektierte oder auch transmittierte Licht eine kontrastreiche körnige Struktur, die Granulation oder auch Speckle-Muster genannt wird. Optisch rau ist eine Oberfläche, wenn ihre mikroskopischen Oberflächenstrukturen etwa gleich groß oder größer als die Wellenlänge des verwendeten Lichts sind. Das an diesen Strukturen reflektierte, gestreute und gebeugte Licht ist als Speckle-Muster entsprechend seiner Kohärenzeigenschaften über lange (Laser) oder kurze (Weißlicht) Strecken längs der Ausbreitungsrichtung zu beobachten. Man kann die raue Oberfläche auch als statistisch angeordnetes Gitter betrachten.

Die mittlere Speckle-Größe ist quer zur optischen Achse (Bild 1)

$$\Delta x_s \approx \frac{\lambda}{\Omega} \approx \lambda \frac{L}{D} \quad (1)$$

und in Richtung der optischen Achse

$$\Delta z_s \approx \frac{\lambda}{\Omega^2} \approx \lambda \left(\frac{L}{D}\right)^2 \quad (2)$$

In diesen Beziehungen bedeuten

λ : Lichtwellenlänge, Ω : Winkel, unter dem das beleuchtete Oberflächenelement gesehen wird, D : Durchmesser des beleuchteten Oberflächenelements, L : Abstand der Beobachtungsebene von der Oberfläche.

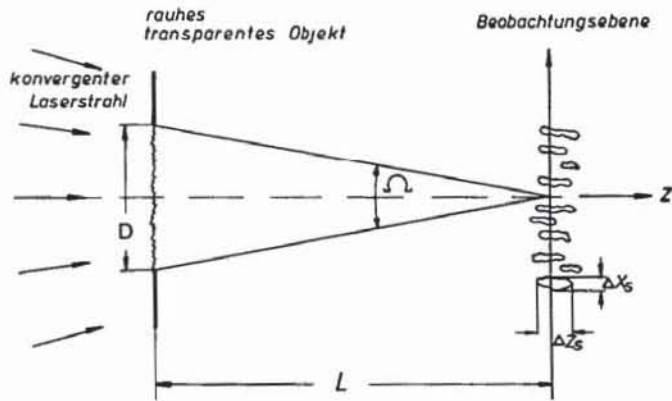


Bild 1. Mittlere Speckle-Größen in Längs- und Querrichtung, Δz_s und Δx_s mit dem wirksamen Fleckdurchmesser D , dem Abstand der Beobachtungsebene L und dem Betrachtungswinkel Ω .

Für die Anwendbarkeit von Speckle-Meßverfahren ist entscheidend, bei welcher minimalen Rauigkeit einer Oberfläche noch auswertbare Speckles entstehen. Ein Spiegel in optischer Qualität sollte erwartungsgemäß keine Speckles erzeugen, Endmaße dagegen zeigen einen noch visuell erkennbaren Speckle-Kontrast.

3 Erzeugung bewegter Speckles

Wird eine mit Laserlicht beleuchtete raue Oberfläche bewegt, so wird das in einer Beobachtungsebene aufgefangene Speckle-Muster eine entsprechende Veränderung erfahren. Von einer möglichen dreidimensionalen Objektbewegung soll hier nur der eindimensionale Fall, die gleichförmige Bewegung in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse, betrachtet werden. Idealerweise lassen sich dabei, je nach Auslegung der optischen Schaltung, drei Effekte unterscheiden: 1) Reine translatorische Bewegung des Specklefeldes ohne Änderung der internen Struktur der einzelnen Speckles, 2) reines Quellen der einzelnen Speckles ohne irgendeine erkennbare Bewegung des gesamten Specklefeldes und 3) ein Bereich dazwischen, wo eine Gesamtbewegung mit allmählicher Strukturänderung existiert. Bei vielen praktischen Anwendungen wird meist der Fall 3) zutreffen, da die fallunterscheidenden Grenzbedingungen selten streng erfüllbar sind.

Eine erste meßtechnische Anwendung des Bewegungseffekts zur Geschwindigkeitsmessung einer rotierenden Nickelscheibe ist in [10] beschrieben; eine erste theoretische Behandlung von Bewegung und Strukturänderung findet sich in [9]. Darin wird gezeigt, daß 1) die Bewegung des Specklefeldes von der Phasenkrümmung der Beleuchtungswelle (divergent oder konvergent) erzeugt wird, 2) das Quellen durch eine ebene Phasenfront hervorgerufen wird und 3) eine allmähliche Strukturänderung mit der Bewegung einhergeht. Diese begleitende Strukturänderung ist ein für die Bewegungsanalyse unerwünschter Störeffekt und wird bestimmt durch das Größenverhältnis des beleuchteten Oberflächenelementes und der darin befindlichen Mikrostrukturen.

Die in einer Beobachtungsebene mit dem Abstand L zum Objekt resultierende Speckle-Bewegung wird durch die Beziehung

$$x_s = x_0 \left(1 + \frac{L}{z}\right) \quad (3)$$

beschrieben. Dabei bedeuten x_s : Speckle-Verschiebung, x_0 : Objekt-Verschiebung, L : Abstand Objekt - Beobachtungsebene, z : Abstand Objekt - Lichtquelle oder Laser-Strahltaile.

Diese Gleichung gilt allerdings nur für die Näherungen $L \gg z$ und $z/z_0 \gg 1$, mit dem axialen Strahlparameter z_0 eines Gaußschen Strahles. Ein Gaußscher Strahl wird näherungsweise durch einen Laser erzeugt, der in seinem Transversalmodus kleinster Ordnung, dem Grundmode (TEM_{00}) schwingt. Die Größen w_0 und z_0 sind die kennzeichnenden Strahlparameter eines Gaußschen Strahles; in der Ebene $z = 0$ hat der Strahlradius ein Minimum, Strahltaile (beam waist) genannt. Der Tailenradius wird mit w_0 bezeichnet. Der Abstand $z = z_0$ von der Taille ist gekennzeichnet durch den Amplitudenabfall auf $1/\sqrt{2}$ auf der Achse. In der Strahltaile ist die Fläche gleicher Phase oder die Wellenfront eben (Bild 2), und auch für

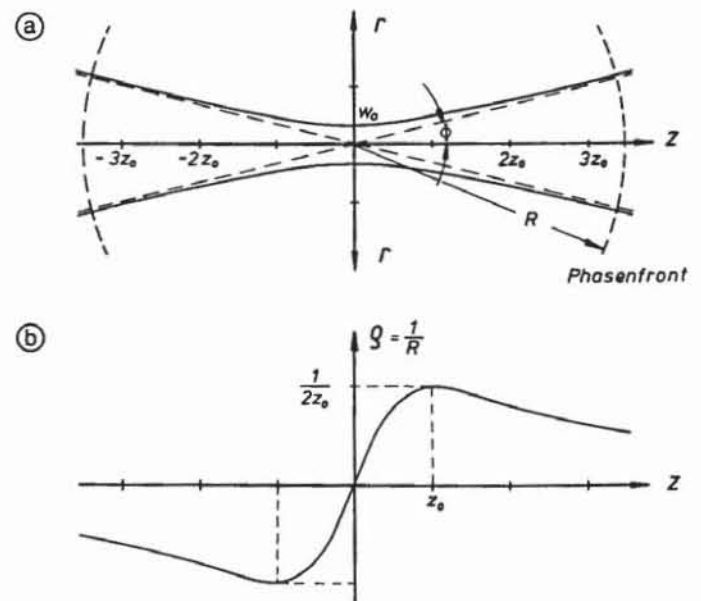


Bild 2. Axiale Strahlstruktur mit dem Strahltaillenradius w_0 , dem axialen Strahlparameter z_0 , dem Radius der Wellenfront R und dem halben Öffnungswinkel ϕ (a) und axialer Verlauf der Wellenfrontkrümmung (b).

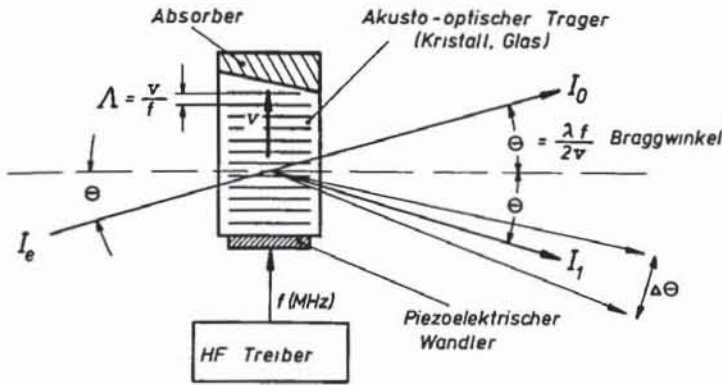


Bild 3. Akusto-optischer Deflektor. Eine piezoelektrisch erzeugte Schallwelle läuft mit der Geschwindigkeit v durch den Kristall und wird durch den Absorber wieder gedämpft. Durch Frequenzvariation ändert sich die akustische Wellenlänge Λ , die mit den Schallwellen einhergehenden Dichteänderungen wirken wie ein Phasengitter veränderlicher Gitterkonstante. Der gebeugte Laserstrahl I_1 wird proportional der Ultraschallfrequenz abgelenkt.

große Abstände von der Taille nähern sich die Wellenfronten einer Ebene. Eine zweite Bedeutung der Bezugsordinate z_0 ist der Ort, an dem die Wellenfronten extreme Krümmung besitzen.

In den praktischen Versuchen zeigt sich, daß ein verlässlicher Specklebewegungs-Effekt ab etwa $3z_0$ zu erwarten ist; in dieser Fokussentfernung kann auch eine weitgehend sphärische Wellenfront angenommen werden. Hat die Oberfläche innerhalb der beleuchteten Fläche selbst eine einheitliche Krümmung, so bildet sich aus beiden Einflüssen eine resultierende Phasenkrümmung, die im Extremfall auch ganz verschwinden kann (reines Quellen). Ideale Verhältnisse vorausgesetzt ist es gleichwertig, eine Speckledynamisierung durch eine bewegte Oberfläche oder durch eine bewegte Lichtquelle zu erzeugen. In diesem Experiment wird ein akusto-optischer Strahlablenker (Deflektor) zur Erzeugung der Specklebewegung eingesetzt. Akusto-optische Bauteile, auch Bragg-Zellen genannt, basieren auf der Beugung des Lichts durch Ultraschall erzeugte Dichteänderungen (Bild 3). Der Weg des abgelenkten fokussierten Tastflecks in der Brennebene einer Linse kann mit der Beziehung

$$y' = f' \tan \Delta\theta \tag{4}$$

berechnet werden; dabei ist f' die Brennweite der Fokussieroptik. Für $f' = 40$ mm beträgt der Tastweg folglich $y' = 130 \mu\text{m}$. Im Gegensatz zur Speckle-Dynamisierung durch eine mechanische Relativbewegung zwischen Tastkopf und Oberfläche muß bei der akusto-optischen Strahlablenkung berücksichtigt werden, daß für extrafokale Bereiche der Tastweg größer ist als für intrafokale:

$$y' = (f' \pm z) \Delta\theta \tag{5}$$

Bei gleicher Ablenkzeit des Strahles erhält man folglich auch eine höhere extrafokale Specklegeschwindigkeit; bei einer Brennweite von $f' = 40$ mm und bei einer Meßbereichsgrenze für die Abstandsmessung von $z = \pm 1$ mm erreicht der systematische Geschwindigkeitsunterschied etwa 5% für die extremalen Punkte.

4 Messen der Specklegeschwindigkeit

In einfacher Weise läßt sich die Specklegeschwindigkeit aus der Phasendifferenz der Signale zweier dicht nebeneinander liegender Fotodioden gemäß Bild 4 ermitteln. Gleichzeitig sind aus diesem Bild aber auch die Schwierigkeiten ersichtlich, die durch die Strukturänderung der Speckles hervorgerufen werden: In vielen Fällen ist aus den Signalverläufen der beiden Fotodioden nicht eindeutig zu erkennen, ob es sich um eine echte Phasendifferenz aufgrund translatorischer Bewegung oder um einen Amplitudenunterschied aufgrund der Strukturänderung der Speckles handelt. Deutlich zum Ausdruck gebracht wird in der Arbeit [5] die Tatsache, daß lediglich zwei Fotoempfänger in der Beobachtungsebene keine optimale Auswertung der vorhandenen Information gewährleisten. Vorgeschlagen werden deshalb Mehrfachempfänger-Anordnungen.

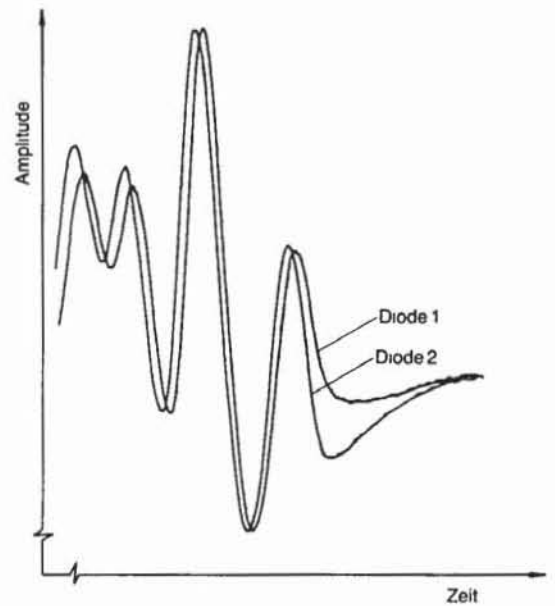


Bild 4. Bestimmen der Specklegeschwindigkeit aus der Phasendifferenz der Signale zweier Fotodioden, die in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse dicht nebeneinander liegen. Der Abstand der Beobachtungsebene von der Werkstückoberfläche beträgt $L = 1$ m, die Diodenfläche $A_d = 0,1 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm}$, der Diodenmittenabstand $x_d = 0,1 \text{ mm}$.

Die Geschwindigkeitsmessung einer rauhen Oberfläche mit einem Speckleverfahren und einem Amplitudengitter wurde erstmals in [10] durchgeführt. Über eine ausführliche Untersuchung und Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist in [11] berichtet.

Alle Messungen wurden mit einem Prismengitter der Firma Ernst Leitz Wetzlar durchgeführt, das mit der Feldlinse zusammen eine Einheit bildet. Die Gitterkonstante beträgt $g = 0,8 \text{ mm}$ und der Durchmesser $Dg = 32 \text{ mm}$; daraus folgt die Zahl der Gitterperioden mit $Ng = 40$. Eine schematische Darstellung zeigt Bild 5. Bei der Auswertung der Specklegeschwindigkeit mit diesem Differenzgitter entsteht ein periodisches Signal ohne störenden Gleichlichtanteil aufgrund schwankender Lichtintensitäten [12]. Ein gültiger Signalabschnitt begrenzter Dauer wird in Anlehnung an den angelsächsischen

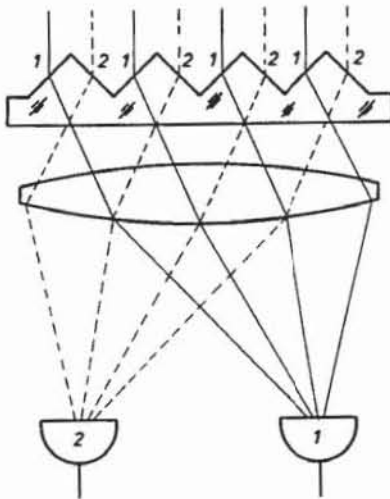


Bild 5. Schematische Darstellung des Prismengitters mit Feldlinse und zwei Fotodioden.

Sprachgebrauch auch *Burst* genannt; das geschwindigkeitsproportionale Signal zeigt eine Einhüllende vergleichbar einer Amplitudenmodulation, allerdings nicht in vorhersehbarer oder regelmäßiger Anordnung und Dauer (Bild 6). Die Frequenzbestimmung im Zeitbereich ist grundsätzlich unabhängig von der Zahl ausgewerteter Signalperioden, und die systembedingte Schnelligkeit von Zähltechniken gestattet die Erfassung kurzer gültiger Signalabschnitte oder Bursts bei beliebiger Signalausfallrate. Eine hohe Auflösung ist dann aber nur mit einem Periodendauer-Zähler zu erreichen, der mit einem hochfrequenten Quarzoszillator die Zeitintervalle zwischen aufeinanderfolgenden Nulldurchgängen auszählt.

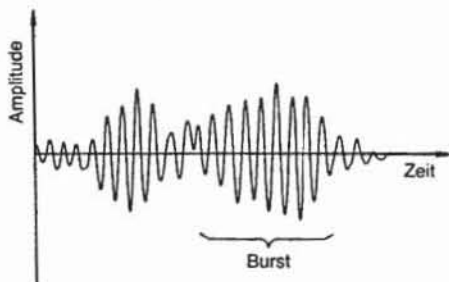


Bild 6. Amplituden- und frequenzmodulierter Signalzug begrenzter Dauer oder *Burst*, gemessen durch Auswerten bewegter Speckles mit einem Gittersensor.

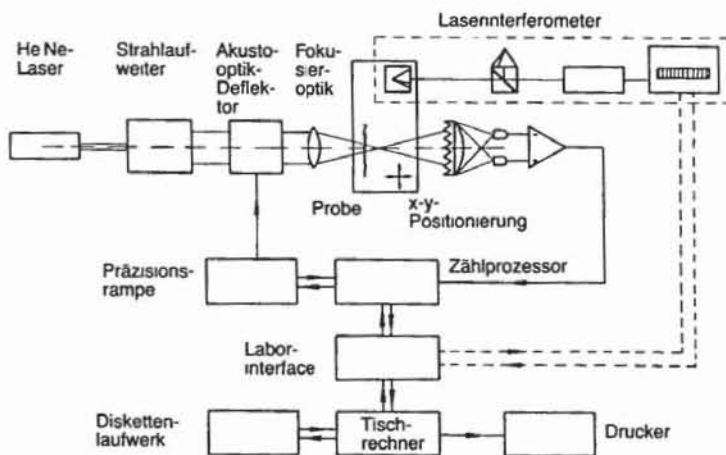


Bild 7. Blockschaltbild des Laboraufbaus zur Abstandsmessung durch Auswerten der Specklegeschwindigkeit. Das Laserinterferometer dient als genaue Referenz und kann zur Dokumentation ebenfalls an den Rechner angeschlossen werden.

Speziell für die Auswertung dieser Signale ist ein Zählprozessor entwickelt worden. Der Zählprozessor ist so ausgelegt, daß damit sowohl ein Burst, ein Signalzug begrenzter Dauer, als auch Einzelperioden ausgezählt werden können. Dabei steuert der Zählprozessor seinen Zugriff auf das Signal selbst in der Weise, daß nur Signalperioden mit ausreichender Amplitude berücksichtigt werden; diese Methode wird auch „burst gating“ genannt. Den Laboraufbau in schematischer Darstellung zeigt Bild 7.

5 Meßergebnisse

Im Gegensatz zu den anderen genannten Speckle-Auswertemethoden ergibt die Periodendauermessung einen nahezu linearen Meßbereich von etwa $\pm 0,2$ mm bis $\pm 1,5$ mm (der genaue Meßbereich ist abhängig von den Daten der optischen Schaltung, vor allem von der Gitterkonstanten). Werden die Versuchsbedingungen sehr sorgfältig überwacht und wird gewährleistet, daß die ausgewertete Periodenzahl während der axialen Verlagerung der Probe konstant bleibt (das geht natürlich nur über kleine Bereiche $\Delta z \approx 10 \mu\text{m}$), erhält man Ergebnisse wie in Bild 8 dargestellt. Ausgewertet wird ein einzelner wohldefinierter Burst mit 16 Perioden. Nach der Übergabe der Daten an den Rechner wird der Mittelwert aus 22 Bursts berechnet. Der Mittelwert aus jeweils 5 voneinander unabhängigen Messungen mit der zugehörigen Unsicherheit ist im Diagramm eingetragen. Die Unsicherheit einer Einzelmessung aus 22 Bursts zu jeweils 16 Perioden liegt typischerweise bei $1 \sigma < 0,2\%$, die Unsicherheit des Mittelwerts aus 5 unabhängigen Messungen typisch bei $1 \sigma \approx 0,05\%$. Eine schnelle Abschätzung der axialen Auflösung ergibt $\Delta z \approx \Delta \tau v_0 L/g \approx \Delta \tau \cdot 770 \text{ mm}$ mit $L = 55 \text{ mm}$, $g = 0,8 \text{ mm}$ und $v_0 = 11 \text{ mm/s}$. Wird die Probe kräftig axial verschoben und interferometerkon-

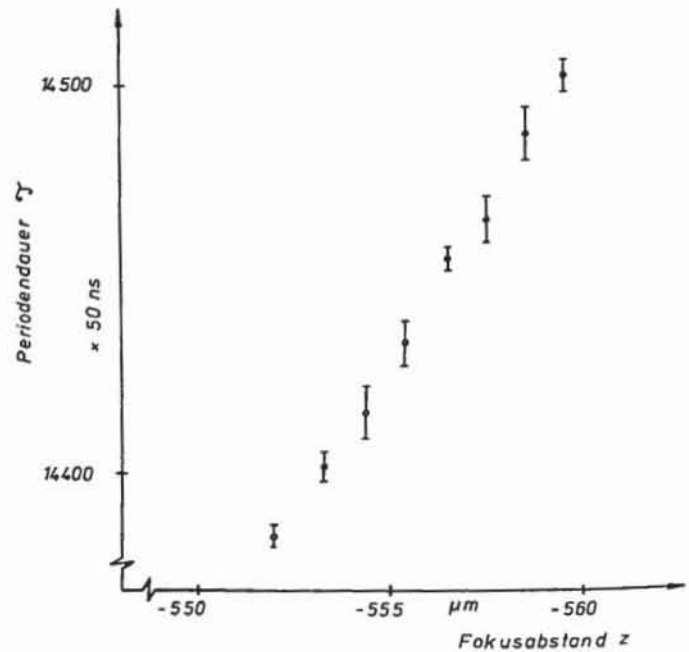


Bild 8. Fokusabhängige Periodendauermessung an einer flachgeschliffenen Metalloberfläche, $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, Mikroskopobjektiv 3,2fach, $L = 55 \text{ mm}$. Axialer Auflösungstest für einen wohldefinierten Burst.

trolliert repositioniert, so ist der Antastfehler der gesamten Meßanordnung kleiner als 10^{-3} (Wiederholbarkeit). Großer geforderter Arbeitsabstand und mäßige Apertur bei guter Empfindlichkeit und möglichst großem Meßbereich lassen wenig Spielraum für die Optimierung der Antastgeometrie. Damit überhaupt brauchbare Signale zustande kommen, muß der Tastfleck größer als die Korrelationslänge der Oberflächenstrukturen sein. Das ist jedoch nur eine notwendige und meist keine hinreichende Bedingung. Für eine Normalverteilung der Rauigkeiten und folglich der Speckles muß der Tastfleck sehr viel größer als die Korrelationslänge sein. Eine 'tote' Zone um den engeren Fokusbereich ist unvermeidlich. Die eigentliche Maßverkörperung für die Meßverfahren mit Specklebewegung ist die Krümmung der Phasen- bzw. Wellenfront $\varrho = 1/z$; jede ungewollte und unkontrollierte Änderung gegenüber der idealen sphärischen Wellenfront durch optische Bauteile oder die Oberfläche selbst führt zu schlechteren Signalen. Für das Zustandekommen eines Bursts mit einer eindeutigen Einhüllenden und kleiner Frequenzvariation innerhalb des Bursts sind folgende Voraussetzungen entscheidend:

- 1) Ein genügend großes ebenes Oberflächenelement. Wird der daraus resultierende maximale ebene Tastweg mit $x_{0\max}$ bezeichnet, folgt die theoretisch erreichbare Anzahl von Signalperioden in einem Burst mit $N_s = 1/g \cdot x_{0\max} (1 + L/z)$. In der Praxis werden jedoch durch den Einfluß des begrenzten Tastflecks meist kürzere Bursts zu erwarten sein.
- 2) Oberflächenstrukturen mit vergleichbaren vertikalen und horizontalen Dimensionen, die deutlich kleiner als der Tastfleck sind.

Dieser Sachverhalt läßt sich auch noch anders formulieren:

Für das Entstehen eines Bursts mit genügend Signalperioden ausreichender Amplitude und möglichst kleiner Frequenzvariation müssen genügend Speckles vergleichbarer Größe und Geschwindigkeit über einen ausreichenden Zeitraum zusammenwirken.

Die Beschreibung eines axialen Antastvorganges faßt die Möglichkeiten dieses Verfahrens zusammen:

- Bei einem ersten lateralen Abtasten der Oberfläche mit dem Akusto-Optik-Deflektor sucht der Zählprozessor nach einem gültigen Signal. Dabei wird nach folgenden Kriterien gewertet:
 - a) ausreichende Signalamplitude über dem Rauschen,
 - b) Mindestanzahl gültiger Signalperioden N_{\min} ,
 - c) maximal zulässige Bandbreite $\Delta f_{\max} = 1/\Delta\tau_{\max}$.

Im augenblicklichen Ausbaustadium wird bei a) die grobe Signalvorauswahl visuell am Kontroll-Oszilloskop und die eigentliche Signalauswahl hardwaremäßig vorgenommen; die Mindestanzahl b) ist manuell einstellbar und hardwaremäßig durchführbar oder softwaremäßig nachträglich im Rechner realisierbar; die maximale Bandbreite c) ist softwaremäßig verwirklicht. Alle Kriterien sind jedoch vollständig in schneller Hardware realisierbar.

- Hat der Zählprozessor einen gültigen Burst gefunden, so ist aus der bekannten räumlichen Lage des Tastkopfes (Meßmaschine) und der bekannten Ablenkung des fokussierten Laserstrahles (Ablenkspannung am Akusto-Optik-Deflektor) auch die laterale Lage des signalerzeugenden Oberflächenelementes bekannt.
- Je nach gewünschter Genauigkeit genügt ein weiterer lateraler Tastvorgang für schnelles Einfangen, oder der laterale Tastvorgang muß für ein genaueres Ergebnis entsprechend oft wiederholt werden (Rauschminde rung).
- Die axiale Lage des signalerzeugenden Oberflächenelementes wird unter Berücksichtigung aller wichtigen Einflußgrößen als Fokusabstand z ermittelt, und zwar für intrafokale Bereiche

$$z_i = \frac{f' \cdot L}{\left(\frac{g \cdot t}{\Delta\theta \cdot \tau} + L\right)} \quad (6)$$

und für extrafokale Bereiche

$$z_e = \frac{1}{4} \left\{ \left(\frac{g \cdot t}{\Delta\theta \cdot \tau} - 2f' - L \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{g \cdot t}{\Delta\theta \cdot \tau} - 2f' - L \right)^2 - 8f' L \right)} \right\} \quad (7)$$

Dabei ist L : Abstand des Gittersensors, f' : Brennweite der Fokussieroptik, $\Delta\theta$: Strahlablenkung durch den Akusto-Optik-Deflektor, t : Ablenkzeit des Strahls, g : Gitterkonstante des Gittersensors, τ : gemessene Periodendauer des specklegeschwindigkeitsproportionalen Signals.

Da nicht alle Größen dieser Gleichung ohne weiteres einzeln auf die erforderliche Genauigkeit bestimmbar sind, ist in jedem Falle eine Kalibrierung des Tastkopfes vor absoluten Abstands- oder Dimensionmessungen vorzunehmen.

- Eine Richtungserkennung bzw. ein eindeutiger Meßbereich läßt sich folgendermaßen erreichen:
 - a) Eine definierte kleine axiale Antastbewegung auf die Oberfläche zu erzeugt eine Periodendauerzunahme (extrafokal) oder -abnahme (intrafokal).
 - b) Ein bewegtes Gitter erkennt die Bewegungsrichtung der Speckles (gleichsinnig mit der lateralen Tastbewegung $\hat{=}$ extrafokal).
 - c) Eine Doppelfokusmethode im Zeitmultiplex funktioniert ähnlich a).
- Eine Neigung der angetasteten Oberfläche zur Antastrichtung wird nur über einen größeren lateralen Tastweg erkennbar sein, da prinzipbedingt nur kurze Bursts mit zunehmender Signalausfallrate (entsprechend einer Neigungszunahme) zu erwarten sind.
- Die Signalausfallrate wird hauptsächlich durch die jeweils angetastete Oberflächenstruktur bestimmt. Die Signalausfallrate ist dabei definiert als der laterale Tastweg ohne gültiges Signal dividiert durch den gesamten lateralen Tastweg. Übliche statistische Beschreibungen

der Rauigkeit sind nur sehr eingeschränkt zur Vorhersage der Signalausfallrate geeignet. Da sich die Tastfleckgröße über den Meßbereich ändert, wäre vor allem auch die Angabe der Korrelationslänge der Oberflächenstrukturen wünschenswert.

- Eine grobe Angabe der Einsatzgrenzen des Meßverfahrens ist gleichwohl anhand des Mittenrauhwertes R_a möglich; auswertbare Signale werden mit Oberflächennormalen von $R_a = 0,0125 \mu\text{m}$ bis $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ gewonnen. Bei $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ist die Signalausfallrate allerdings schon erheblich.

6 Schlußfolgerungen

Durch Auswerten der Specklegeschwindigkeit sind zwar schon axiale Auflösungen im Mikrometerbereich erzielt worden bei Tastwegen im Zentimeter- bis Meterbereich. Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Speckleverfahren erreicht dagegen Auflösungen von $\leq 1 \mu\text{m}$ bei lateralen Tastwegen von etwa $100 \mu\text{m}$ bis $200 \mu\text{m}$. Bezogen auf 35 mm freien Arbeitsabstand entspricht das einer Auflösung von 3×10^{-5} , bezogen auf $\pm 1 \text{ mm}$ Meßbereich, einer Auflösung von 5×10^{-4} .

Im realisierten Laboraufbau erfolgt die laterale Dynamisierung zwischen Tastkopf und Oberfläche durch eine akusto-optische Laserstrahlableitung, die Geschwindigkeit der Speckles wird durch einen Gittersensor in eine schmalbandige Frequenz umgewandelt. Die hochauflösende Frequenzmessung von kurzzeitigen begrenzten Signalabschnitten (Bursts) wird mit einem selbstentwickelten Periodendauer-Zähler vorgenommen; aufgrund mehrerer digitaler und analoger Signalbewertungen ist dieser als Zählprozessor (mit Rechnerkopplung) ausgeführt. Angetastet werden Oberflächen mit einem Mittenrauhwert von $R_a = 0,0125 \mu\text{m}$ bis $R_a = 1,6 \mu\text{m}$. Für eine mögliche axiale Auflösung der fokusabhängigen Oberflächenlage von $1 \mu\text{m}$ oder besser sind allerdings Mindestvoraussetzungen an das jeweils angetastete Oberflächenelement zu stellen: Stückweise eben (Größenordnung $100 \mu\text{m}$) und mikroskopische Höhen- und Längsausdehnungen jeweils deutlich kleiner als der wirksame Tastfleckdurchmesser. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, wird kein zuverlässiges Signal erzeugt (Signalausfall). Die Signalausfallrate nimmt erwartungsgemäß mit rauheren Oberflächen zu.

Diese Eigenschaft ist im Prinzip des hier angewandten lateralen Meßkriteriums begründet. Dabei hat das entwickelte Meßverfahren jedoch die positive Eigenschaft, daß Signalausfälle als solche erkannt werden und Fehlmessungen nahezu auszuschließen sind. Anforderungen an die Signalqualität und an die Meßzeit sind proportional der geforderten Genauigkeit, d. h. es sind auch auf rauheren Oberflächen schnelle Lage- bzw. Abstandsmessungen mit verminderter Auflösung und Genauigkeit möglich. Wird eine geringere axiale Auflösung verlangt, vergrößert sich der Meßbereich über die $\pm 1,5 \text{ mm}$. Eine wesentliche Verbesserung der Signalqualität hinsichtlich Rauschen ist durch Einsatz von stabilisierten Lasern (Diodenlaser) zu erreichen.

Literatur

- [1] Stöferle, T. und Ertl, F.: Optisch berührungslose Längenmessung. Werkstatt und Betrieb 110 (1977), S. 175-176.
- [2] Isenor, N.R.: Object-image relationships in scattered laser light. Appl. Opt. 6 (1967), S. 163.
- [3] McLaughlin, J.L.: Focus-position sensing using laser speckle. Appl. Opt. 18 (1979), S. 1042-1045.
- [4] Erdmann, J.C. und Gellert, R.I.: Speckle field of curved, rotating surfaces of Gaussian roughness illuminated by a laser light spot. J. Opt. Soc. Am. 66 (1976), S. 1194-1204.
- [5] Pusey, P.N.: Photon correlation study of laser speckle produced by a moving rough surface. J. Phys. D.: Appl. Phys. 9 (1976), S. 1399-1409.
- [6] Giglio, M., Musazzi, S. und Perini, U.: Distance measurement from a moving object based on speckle velocity detection. Appl. Opt. 20 (1981), S. 721-722.
- [7] Hayashi, A. und Kitagawa, Y.: Fiber-optic distance sensor based on speckle velocity detection. Opt. Commun. 49 (1985), S. 91-94.
- [8] Hege, G.E.: Speckleverfahren zur Abstandsmessung. Dissertation, Universität Stuttgart (1984).
- [9] Spornon, T.M.: The scattering of coherent light from a rough surface. Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D) s2, v2 (1969), S. 1027-1034.
- [10] Stavis, G.: Optical diffraction velocimeter. Instruments & Control Systems 39 (1966), S. 99-102.
- [11] Schulz, W.: Ein Verfahren zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung mit Laserlicht. Dissertation, Universität Karlsruhe (1972).
- [12] Delingat, E.: Berührungslose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. LEITZ-Mitt. Wiss. u. Techn. VI (1976), S. 249-257.

Dr.-Ing. G.E. Hege, Robert Bosch GmbH, Tübinger Straße 123, D-7410 Reutlingen.

Prof. Dr. Hans J. Tiziani, Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, D-7000 Stuttgart 80.