

Optischer Sensor zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung

R. Büttner, A. Bösel, K.-D. Salewski

Institut für Physik, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

mailto:salewski@physik.uni-greifswald.de

Vorgestellt wird ein berührungslos arbeitender Sensor zur orts aufgelösten Abstands- und Geschwindigkeitsmessung an bewegten Objekten mit optisch rauen Oberflächen, der auf der Auswertung von Specklefeldern beruht.

1 Einleitung

Im Folgenden soll ein robuster Sensor zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung an rotierenden Objekten vorgestellt werden, der zum einen auf der Erzeugung zweier zeitlich versetzter Laser-Speckle-Felder und zum anderen auf der Korrelationsanalyse der entstehenden Signale mittels Computer basiert.

2 Speckle-Entstehung

Bei Beleuchtung einer rauen Oberfläche mit kohärenter Strahlung bildet das Streulicht eine körnige Struktur aus, das sogenannte Specklemuster.

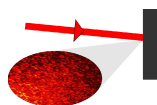


Abbildung 1 Specklemusterentstehung bei Beleuchtung einer rauen Oberfläche mit Laserstrahlung

3 Strahlen an zwei Beugungsgittern

Trifft ein Laserstrahl unter einem Winkel α_i auf ein Transmissionsgitter mit der Gitterkonstanten g , so entstehen mehrere Beugungsmaxima unter den Winkeln α_n zur Gitternormalen:

$$n\lambda = g(\sin \alpha_n - \sin \alpha_i) \quad (1)$$

Bei der Kombination zweier Gitter treten dann verschiedene, unter Umständen sich kreuzende oder parallel verlaufende Strahlen auf (Abb. 2).

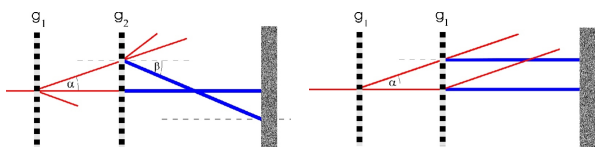


Abbildung 2 Verlauf ausgewählter Strahlen an zwei Beugungsgittern unterschiedlicher Gitterkonstanten mit $g_1 > g_2$ (links) bzw. gleichen Gitterkonstanten $g_1 = g_2$ (rechts).

Unter Verwendung von Gl. 1 erhält man für den Schnittwinkel β der ausgewählten Strahlen (blau) die

allgemeine Beziehung:

$$\sin \beta = \frac{\lambda}{g_1} - \frac{\lambda}{g_2} \quad (2)$$

Im Fall $g_1 = g_2$ folgt z.B. $\beta = 0$, (parallele Strahlen).

4 Prinzip des Speckle-Sensors

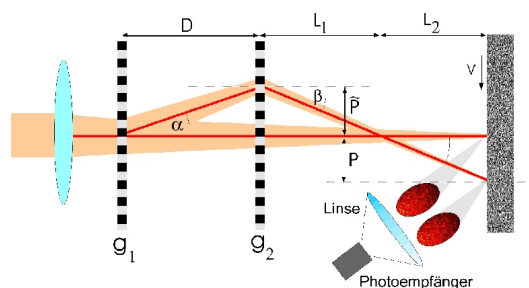


Abbildung 3 Strahlen an zwei Gittern, Bezeichnung der geometrischen Größen

Treffen zwei Strahlen, die einen Winkel $\beta \neq 0$ einschließen, auf eine Oberfläche, mit einer Entfernung L_2 vom Strahl-Kreuzungspunkt, so entstehen zwei Lichtflecken im Abstand

$$P = L_2 \tan \beta \quad (3)$$

Weist die Oberfläche eine ausreichende Rauigkeit auf, so entstehen zwei Speckle-Felder, die bei Bewegung der Oberfläche eine Intensität $I_1(t)$ bzw. $I_2(t)$ aufweisen. Sind diese Lichtflecken derart angeordnet, dass ein Oberflächenelement beide nacheinander passiert (Abb. 3), so sind $I_1(t)$ und $I_2(t)$ identisch, weisen aber zueinander einen zeitlichen Versatz

$$\tau = \frac{P}{v} \quad (4)$$

auf. Dieser zeigt unter Berücksichtigung von Gl. 3 und 4 sowohl eine Abhängigkeit von der Oberflächengeschwindigkeit v als auch vom Abstand $L = L_1 + L_2$:

$$\tau = \frac{1}{v} \left[L \left| \frac{\lambda}{g_1} - \frac{\lambda}{g_2} \right| - D \frac{\lambda}{g_1} \right] \quad (5)$$

Bei additiver Überlagerung beider Intensitäten am Photodetektor resultiert ein elektrisches Signal $s(t)$,

aus dem der Zeitversatz τ mittels Autokorrelationsfunktion $AKF\{s(t)\}$ bestimmbar ist (Abb. 4).

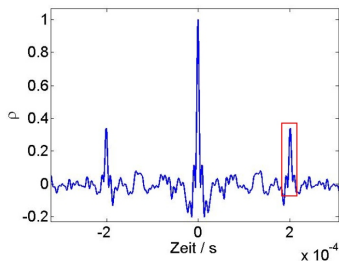


Abbildung 4 Autokorrelationsfunktion eines mit dem Speckle-Sensor aufgenommenen Signalabschnittes. Der gemessene Zeitversatz beträgt $\tau = 2,01 \cdot 10^{-4}$ s.

5 Experimentelle Anordnung

Entsprechend der schematischen Darstellung in Abb. 3 wurde der Versuchsaufbau in Abb. 5 mit einer rotierenden Oberfläche (Rotor) realisiert. Verwendet werden ein kollimierter 10 mW Diodenlaser ($\lambda = 630$ nm), eine Linse ($f = 250$ mm) zur Fokussierung der Laserstrahlen, zwei Beugungsgitter ($g_1 = 14,3 \mu\text{m}$, $g_2 = 9,1 \mu\text{m}$) und ein Photoempfänger (Bandbreite 100 MHz). Nach Verstärkung und Hochpassfilterung wird das elektrische Signal mittels einer Analog-Digital-Wandler-Karte in einen PC eingelesen und entsprechend verarbeitet.

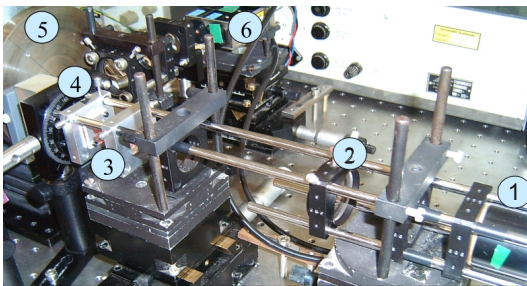


Abbildung 5 Versuchsaufbau bestehend aus Lasermodul (1), Linse (2), Beugungsgittern (3), Umlenkoptik (4), Rotor (5), Photoempfänger (6)

6 Geschwindigkeitsmessung

Werden die Beugungsgitter so gewählt, dass $g_1 = g_2$ (Abb. 2, rechts) ist, so folgt aus Gl. 5:

$$v = -\frac{D}{\tau} \cdot \frac{\lambda}{g_1} \quad (6)$$

Daraus resultiert die Möglichkeit, durch Bestimmung des Zeitversatzes τ die Oberflächengeschwindigkeit zu ermitteln. Werden einzelne kleine Signal-

abschnitte ausgewertet, so erhält man die Oberflächengeschwindigkeit v zeitlich aufgelöst. Dies ermöglicht wiederum eine Zuordnung zwischen Oberflächengeschwindigkeit und Rotorumlafposition und damit eine orts aufgelöste Messung (Abb. 6). Die im Experiment erreichte Geschwindigkeitsauflösung beträgt $0,004 \text{ ms}^{-1}$ (relativer Fehler $1,7 \cdot 10^{-3}$, Länge eines Oberflächenabchnittes 3 mm).

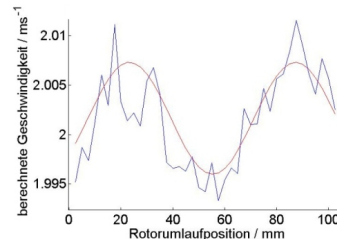


Abbildung 6 Orts aufgelöste Geschwindigkeitsmessung an einem Rotor mit lateraler Auflösung von 3 mm (blau). Es ist eine periodische Geschwindigkeitsmodulation (rot) zu erkennen.

7 Abstandsmessung

Entsprechend Gl. (5) kann nach Bestimmung des Zeitversatzes τ der Abstand zum Rotor ermittelt werden. Abb. 7 zeigt eine Messung, bei welcher der Rotor seinen Abstand im Takt eines Umlaufs ändert (Taumeln). Zusätzlich tritt eine höherfrequente Modulation auf, die als Geschwindigkeitsänderung des Rotors identifiziert werden kann. Ist diese bekannt, können die Abstandswerte korrigiert werden (Abb. 7, links). Bei einem Arbeitsabstand von etwa 80 mm beträgt die erreichte Abstandsauflösung $20 \mu\text{m}$.

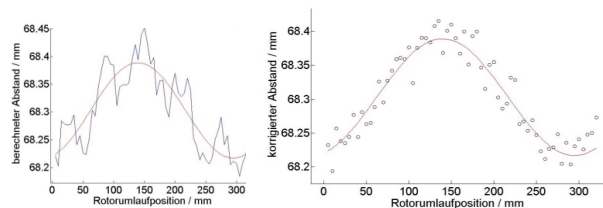


Abbildung 7 Orts aufgelöste Abstandsmessung mit lateraler Auflösung von 5 mm unter Voraussetzung einer konstanten Oberflächengeschwindigkeit (links). Orts aufgelöste Abstandsmessung unter Berücksichtigung der sich zeitlich verändernden Oberflächengeschwindigkeit (rechts).

8 Zusammenfassung

Es wird ein Sensor vorgestellt, der orts aufgelöste Geschwindigkeits- und Abstandsmessungen an rotierenden Objekten mit einer lateralen Auflösung von 3 mm bzw. 5 mm bei einem Arbeitsabstand von ca. 80 mm und einer axialen Abstandsauflösung von $20 \mu\text{m}$ erreicht. Geschwindigkeitsmessungen ergeben eine relative Messunsicherheit von ca. 0,2 %.