

Grundlagen der Velocimetrie



FÜR EINSTEIGER UND ERFAHRENE ANWENDER

Laser Doppler Velocimeter sind berührungslos arbeitende Messsysteme zur Geschwindigkeits- und Längenmessung an bewegten Oberflächen, wie z.B. Stahlblechen, Folien, Papier, Textilien und anderen Bahnwaren.

Das berührungslose und rückwirkungsfreie optische Messverfahren ermöglicht sehr hohe Genauigkeiten und die Anwendung in anspruchsvollen Messaufgaben, die mit berührenden Sensoren nur sehr schwer oder gar nicht zu erfüllen sind, wie z.B. Messungen an glühenden Objekten. So ersetzen Laser Doppler Velocimeter in Stranggießanlagen die dort üblicherweise eingesetzten Messrollen zur Gießlängen- und Gießgeschwindigkeitsmessung. Dank der berührungslosen Messweise haben Schlupf, Zunderablagerungen oder Lagerschäden, wie bei Messrädern, keinen Einfluss mehr auf das Messergebnis. Laser Surface Velocimeter arbeiten nach dem Laser Doppler Prinzip und werten dabei das von einem bewegten Objekt zurück gestreute Laserlicht aus. Das zugrunde liegende Heterodyn-Verfahren ist eine sehr anspruchsvolle und hoch entwickelte Methode. Im Gegensatz zu herkömmlichen berührungslosen Verfahren, die nur den Geschwindigkeitsbetrag erfassen, kann ein Polytec LSV auch Richtungsänderungen und selbst den Stillstand des Objekts messen, wobei die Messgenauigkeit nicht von der Geschwindigkeit abhängt und damit auch noch sehr kleine Bewegungen präzise erfasst werden können.

Polytec GmbH
Polytec-Platz 1-7
D-76337 Waldbronn
Tel. +49 (0) 72 43 6 04-0
Fax +49 (0) 72 43 6 99 44
Lm@polytec.de

Allgemein und für beliebige Geschwindigkeiten wurde das Doppler-Problem durch Einsteins Relativitätstheorie gelöst. Zusammengefasst lautet das Ergebnis seiner scharfsinnigen Analyse, dass sowohl ein ruhender als auch ein bewegter Beobachter (Empfänger) den gleichen Wert der Lichtgeschwindigkeit messen, dass jedoch die jeweiligen Koordinaten, die zwei Beobachter zur Beschreibung von Vorgängen verwenden, in subtiler Weise von ihrer Relativbewegung abhängen.

Der Dopplereffekt

In welcher Weise enthält zurückgestreutes Laserlicht Informationen über den Bewegungszustand des Streuobjektes? Im Folgenden wird veranschaulicht, wie sich eine Relativbewegung zwischen Quelle und Empfänger einer Lichtwelle auf die gemessene Wellenlänge bzw. Frequenz der Welle auswirkt.

Von einer ruhenden Lichtquelle geht eine ebene Lichtwelle mit Frequenz f und Wellenlänge λ aus. Ein Wellenzug der Länge λ passiert in der Zeit $T=1/f$ einen ruhenden Beobachter. Bewegt sich hingegen der Beobachter mit der Geschwindigkeit v von der Lichtquelle weg, so benötigt der Wellenzug eine etwas längere Zeit T' um den Beobachter zu passieren. Welchen Weg cT' legt die Welle in der Zeit T' zurück? Dieser Weg umfasst die Strecke λ des betrachteten Wellenzuges sowie die vom bewegten Beobachter in der Zeit T' zurückgelegte Strecke vT' .

$$cT' = \lambda + vT' \quad (c - v)T' = \lambda$$

Für den bewegten Beobachter hat die Wellenschwingung die Periodendauer T' und wegen $f' = 1/T'$ und $\lambda = c/f$ ergibt sich dann für ihn:

$$(c - v)/f' = c/f$$

und damit die Frequenz f' zu

$$f' = f(c - v)/c = f(1 - v/c)$$

Bewegt sich also der Beobachter von der Lichtquelle weg ($v > 0$), so ist die Lichtfrequenz zu kleineren Werten hin verschoben (Rotverschiebung), bei Bewegung auf die Lichtquelle zu ($v < 0$) wird eine erhöhte Frequenz gemessen (Blauverschiebung).

Die vorangehende Analyse ist eine Näherung für im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit kleine Geschwindigkeiten, die praktisch für alle technisch relevanten Geschwindigkeiten sehr gut erfüllt ist.

Das Differenz-Dopplerverfahren

Die Messaufgabe an den bewegten Objekten, die prinzipiell beliebig lang sein können, erfordert einen Messaufbau mit einer Beobachtungsachse des Sensors senkrecht zur Bewegungsrichtung des Messobjektes.

Polytec Velocimeter arbeiten nach dem so genannten Differenz-Dopplerverfahren. Hierbei werden 2 Laserstrahlen, die jeweils unter einem Winkel φ zur optischen Achse einfallen, auf der Oberfläche des Messobjektes überlagert. Für einen Punkt P, der sich mit der Geschwindigkeit v durch den Schnittpunkt der beiden Laserstrahlen bewegt, sind die Frequenzen der beiden Laserstrahlen gemäß der obigen Formel Doppler-verschoben. Am Punkt P des Messobjektes, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, treten somit folgende Frequenzen auf:

$$f_{p1,2} = f_{1,2} (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_{1,2}/c)$$

$\mathbf{e}_{1,2,e}$ = Einheitsvektoren der Laserstrahlen 1 und 2 und in Richtung Detektor

$f_{1,2}$ = Frequenzen der Laserstrahlen 1 und 2

$f_{p1,p2}$ = Doppler-verschobene Frequenzen der Laserstrahlen 1 und 2 im Punkt P

Der Punkt P emittiert nun Streuwellen in Richtung des Detektors. Da sich P mit dem Messobjekt bewegt, ist die in Richtung $\mathbf{e}_e$ des Detektors emittierte Streustrahlung ebenfalls Doppler-verschoben. Für die Frequenz der Streuwellen in Richtung des Detektors gilt somit:

$$\begin{aligned} f_{e1,e2} &= f_{p1,p2} (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_e/c) \\ &= f_{1,2} (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_{1,2}/c) (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_e/c) \end{aligned}$$



Die Streuwellen überlagern sich auf dem Detektor. Durch Interferenz der Streuwellen aus den beiden Laserstrahlen kommt es in der Überlagerung zu verschiedenen Frequenzkomponenten. Messtechnisch ausgewertet wird die niederfrequente Schwebungsfrequenz der überlagerten Streustrahlen, die der Dopplerfrequenz f_D entspricht. Diese ergibt sich bei gleicher Frequenz (gleicher Wellenlänge) der beiden einfallenden Laserstrahlen als Differenz von f_{e2} und f_{e1} zu:

$$f_D = f_{e2} - f_{e1} \\ = f (\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)/c) (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_e/c)$$

Bei senkrechter Bewegung des Punktes P in Bezug auf die optische Achse und bei gleichem Einfallswinkel φ gilt:

$$\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2) = 2v \sin \varphi \text{ und } \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_e = 0$$

Damit erhält man schließlich:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \varphi$$

Die Dopplerverschiebung ist also direkt proportional zur Geschwindigkeit. Eine anschauliche Erklärung, die zum selben Ergebnis führt, ist die folgende:

Anschauliche Darstellung des Differenz-Doppler-Messverfahrens

Die beiden Laserstrahlen überlagern sich im Messvolumen, und erzeugen in diesem Raumgebiet ein Interferenzmuster von hellen und dunklen Streifen.

Der Streifenabstand Δs ist eine Gerätekonstante, die von der Laserwellenlänge λ und vom Winkel zwischen den Messstrahlen 2φ abhängt:

$$\Delta s = \lambda / (2 \sin \varphi)$$

Bewegt sich ein Teilchen durch das Streifenmuster, so wird das von ihm zurückgestreute Licht in seiner Intensität moduliert.

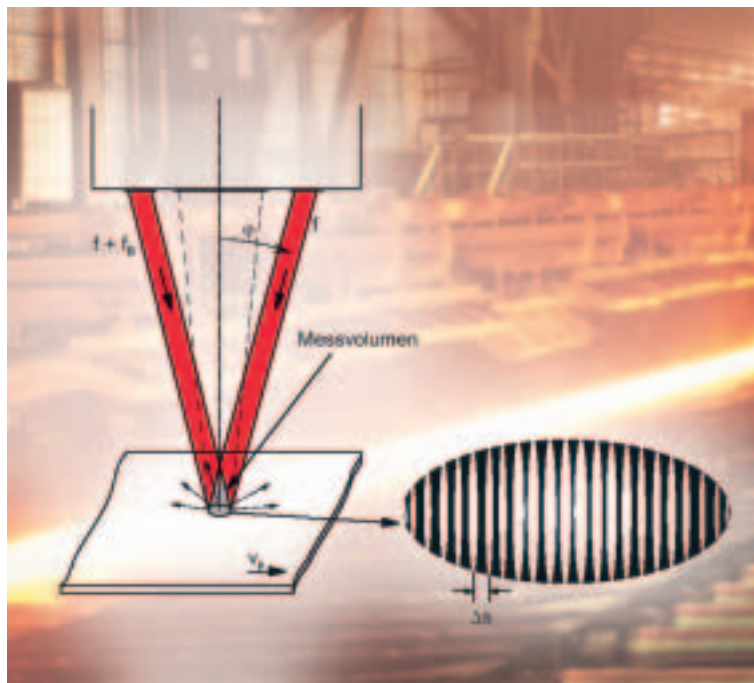
Ein Photoempfänger im Messkopf erzeugt demzufolge ein Wechselstromsignal, dessen Frequenz f_D direkt proportional zur Geschwindigkeitskomponente der Oberfläche in Messrichtung v_p ist, und es gilt:

$$f_D = v_p / \Delta s = \frac{2v}{\lambda} \sin \varphi$$

f_D = Dopplerfrequenz

v_p = Geschwindigkeitskomponente in Messrichtung

Δs = Streifenabstand im Messvolumen



Der Wert $\lambda / \sin \varphi$ bildet die Maßverkörperung für die Geschwindigkeits- und Längenmessung. Er wird für jeden Messkopf exakt gemessen und ist auf dem Identifikationsaufkleber aufgedruckt. Beim Konfigurieren des LSV-Controllers wird der Streifenabstand als Kalibrierfaktor in den nicht-flüchtigen Speicher eingeschrieben. Dort bildet er die Basis für die Berechnung der Messwerte. Wird der Messkopf ausgetauscht, muss der neue Streifenabstand mit Hilfe der LSV-Software eingetragen werden.

Das Heterodynverfahren

Polytec Laser Surface Velocimeter arbeiten im so genannten heterodyn Modus, das heißt die Frequenz einer der Messstrahlen ist um einen Offset von 40 MHz verschoben. Die Streifen im Messvolumen wandern dadurch mit einer Geschwindigkeit entsprechend der Offsetfrequenz f_b . Damit wird es möglich, die Bewegungsrichtung des Messobjektes zu erkennen, sowie bei der Geschwindigkeit Null zu messen. Die resultierende Modulationsfrequenz f_{mod} am Photoempfänger beträgt im heterodyn Modus:

$$f_{mod} = f_b + v_p / \Delta s = f_b + \frac{2v}{\lambda} \sin \varphi$$

Die Modulationsfrequenz wird im Controller durch Fouriertransformation ermittelt und in den Messwert für die Geschwindigkeit v_p umgewandelt.

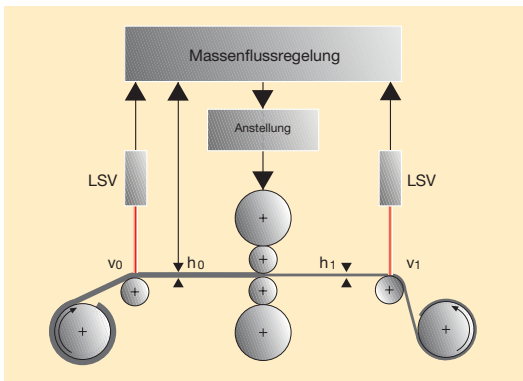
Die Längenmessung erfolgt durch Integration des Geschwindigkeitssignals.

Einsatzgebiete von Polytec Velocimetern

Ein vollständiges LSV Serie 6000 Messsystem besteht aus einem LSV-6200 Signalprozessor und wahlweise dem sehr kompakten optischen Messkopf LSV-065 oder dem flüssigkeitsgekühlten Messkopf LSV-026 für Anwendungen in rauer Industrieumgebung.

Massenflussregelung

Von der weiterverarbeitenden Industrie, besonders im Automobilbereich, werden an die Qualität der verwendeten Stahl- und Aluminiumprodukte immer höhere Anforderungen gestellt. Durch schlupf- und verschleißfreie Geschwindigkeitsmessung mit dem LSV lassen sich die Dicken-toleranzen von Kaltband erheblich verringern. Messen zwei Laser Surface Velocimeter jeweils vor und hinter dem Walzgerüst die Bandgeschwindigkeit, so lässt sich mit Hilfe der Massenfluss-beziehung die Banddicke im Walzspalt bestimmen. Die kürzere Ansprechzeit im Vergleich zur nach-führenden Regelung über die Dickenmessung vor und hinter dem Walzgerüst verkleinert die Banddickentoleranzen erheblich.



Längenmessung an Stückgut

Polytec's LSV Serie 6000 ist ideal geeignet für die Längenmessung zur Zuschnittsteuerung, für die Längenkontrolle bereits fertig zugeschnittener Werkstücke oder für die Positionierung des Werkstücks in einer Sägenstraße. Das Messsystem arbeitet zuverlässig auf allen Oberflächen, egal ob Rohre, Träger, Profile oder Schienen. Selbst Messungen an heißen Oberflächen mit Temperaturen bis zu 1200 °C sind möglich.

Hier einige Anwendungsbeispiele, wie das LSV in einem Rohrwalzwerk eingesetzt wird:

- Rohre mit einer Länge zwischen 6 und 20 m bewegen sich mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit zwischen 2 und 20 m/s über den Rollgang. Das LSV misst die Gesamtlänge.



- Ist die Gesamtlänge bekannt, misst ein zweites LSV dasselbe Rohr noch einmal bei niedriger Geschwindigkeit, um das Rohr in der Sägenstraße in kundenspezifische Abschnittslängen zu unterteilen.

Zur Triggerung der Längenmessung an Stückgut gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Selbst-Trigger: Die Objekterkennung im LSV Serie 6000 startet bzw. stoppt zuverlässig die Längenmessung innerhalb von 100 µs, sobald das Objekt im Messfeld erscheint bzw. verschwindet.
2. Externer Trigger: Wird das LSV über vorhandene Triggereingänge mit externen Lichtschranken kombiniert, kann die höchste Messgenauigkeit bei der Längenmessung erreicht werden.

Durch die große Messfeldtiefe von 200 mm misst das LSV an unterschiedlichen Rohrdurchmessern, ohne dass der Abstand des LSV-065 oder LSV-026 Messkopfs zum Rollgang neu angepasst werden muss. Ein aufwendiges Traversiersystem, das den Abstand vom Messkopf zur Rohroberfläche bei sich ändernden Durchmessern konstant hält, ist nicht notwendig.

Erratum

In LM INFO Special, Ausgabe 1/2003, lautet die Formel auf Seite E2 korrekt:

$$l_{\text{tot}} = l_1 + l_2 + 2\sqrt{l_1 l_2} \cos[2\pi(r_1 - r_2)/\lambda]$$

MEHR INFO?

E-mail: Lm@polytec.de oder www.polytec.de