

Laser-Doppler-Dehnungssensor zur berührungslosen Dehnungsmessung, insbesondere im Hochgeschwindigkeitsbereich oder für kleine Messobjekte

Fangjian Wang¹, Johannes Wölck², Marcel Hess², und Christian Rembe¹

¹Institut für Elektrische Informationstechnik, TU Clausthal, Leibnizstraße 28, DE-38678 Clausthal-Zellerfeld

*²SincoTec Test Systems GmbH, Albrecht-von-Groddeck-Str. 1
DE- 38678 Clausthal-Zellerfeld*

Zusammenfassung

In diesem Artikel berichten wir über eine neue Anwendung unseres berührungslosen optischen Dehnungssensors - Laser-Doppler-Dehnungssensor (LDD). Der LDD kann die Dehnung in dem Hochgeschwindigkeitszugversuch messen, bei dem die Messprobe in weniger als einer Millisekunde vom stationären Zustand auf 30 m/s beschleunigt und gerissen wird. Im Vergleich zu herkömmlichen Messmethoden wie Hochgeschwindigkeitskameras bietet unser LDD eine viel höhere Bandbreite und eine viel bessere Genauigkeit. Darüber hinaus stellen wir die verbesserte optische Struktur des LDD für die Dehnungsmessung an kleinen Messobjekten (Dehnung im Bereich von 2 mm) vor.

Keywords: Laser-Doppler-Vibrometrie, Dehnungsmessung, Hochgeschwindigkeitszugversuch, Kleine Messobjekte

1. Einleitung

Ein berührungsloser optischer Dehnungssensor - Laser-Doppler-Dehnungssensor (LDD) - misst Dehnungen im Bereich von 10^{-5} [1]. Das Messprinzip des LDD basiert auf der heterodynen in-plane Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV). Mit dem Sensor können die Auslenkung und die Geschwindigkeit von zwei benachbarten Messpunkten gemessen werden. Die Dehnung wird aus der differentiellen Auslenkung geteilt durch den bekannten Abstand zwischen den beiden Messpunkten berechnet. Zusätzlich wurde die Signaldiversität genutzt, um ein störungsempfindliches Sensorsignal zu erhalten [2, 3, 4]. Mit dieser Methode konnte der Einfluss des Specklerauschens und der sogenannten Signalaussetzer reduziert werden. Dadurch kann unser LDD dynamische Dehnungen auf rauen Oberflächen ohne eine Oberflächenbehandlung messen, z.B. auf Metallproben bei der Betriebsfestigkeitsprüfung in der Resonanzmaschine [1], und stellt eine Alternative zu klebenden Dehnungsmessstreifen (DMS) dar.

Wir stellen in diesem Beitrag die weitere Entwicklung des LDD vor. Ein wesentlicher Vorteil von Heterodyn-LDV-Sensoren ist die große Messbandbreite, wodurch hochfrequente Bewegungen (z.B. GHz-

Bewegung) [5] oder Hochgeschwindigkeitsbewegungen [6] mit ihnen gemessen werden können. Für solche Anwendungen sind taktile Messverfahren wie DMS nicht geeignet, da DMS normalerweise nur Dehnungen bis zu mehreren kHz messen können [7]. Alternativ kann ein linearer variabler Differentialtransformator (LVDT) zur Messung der Dehnung bei Zugversuchen verwendet werden [8]. Allerdings ist auch der LVDT ein taktiles Messverfahren und die maximale Bandbreite liegt meist im kHz-Bereich. Auch optische berührungslose Messgeräte können eingesetzt werden. Heutzutage ist die kamerabasierte Messmethode wie die digitale Bildkorrelation [9, 10, 11], die digitale Laser-Speckle-Korrelation [12, 13] usw. in der Industrie weit verwendet, um die Dehnung oder die Verformung im Zugversuch zu detektieren. Aber die Hochgeschwindigkeitskamera ist nicht nur teuer, sondern hat auch andere Nachteile. Um eine sehr hohe Abtastrate zu erreichen, ist die Anzahl der Pixel der Kamera begrenzt. Das bedeutet, dass die Auflösung schlecht ist. Aufgrund der extrem kurzen Aufnahmezeit der Kamera ist für solche Anwendungen eine zusätzliche starke Beleuchtung erforderlich. Der Stromverbrauch ist daher sehr hoch. Aus diesen Gründen wurde unser LDD verbessert, so dass er für Hochgeschwindigkeitszugversuche eingesetzt werden kann. Im

Zugversuch wurde die Messprobe in weniger als einer Millisekunde vom unbelasteten Zustand auf eine Geschwindigkeit von 30 m/s beschleunigt und zerrissen. Nach dem heterodyninterferometrischen Messprinzip des LDD [14, 15] ist die zu messende Geschwindigkeit proportional zur Doppler-Frequenzverschiebung (der Differenz zwischen der Trägerfrequenz und der Frequenz des Messsignals). Für den Dehnungssensor ist daher eine große Signalbandbreite erforderlich, um diese Dynamik mit dem Sensorsignal zu erfassen. Für diese Anwendung haben wir daher die Signalbandbreite auf 10 MHz erweitert. Damit kann unser Sensor mit dem aktuellen optischen Aufbau Bewegungen mit einer Geschwindigkeitsänderung von 0 m/s bis 30 m/s bei einer Beschleunigung von weit über 1000 g messen. Durch die Erhöhung der Signalbandbreite im Vergleich zu der bereits veröffentlichten Version [1, 2], erhöht sich jedoch auch die Rauschleistung des Messsignals. Wir haben die Optik so optimiert, dass mehr Streulicht vom Photodetektor detektiert werden kann und sich die Auflösung durch die erhöhte Bandbreite nicht verschlechtert. Wir zeigen die Ergebnisse unseres ersten Zugversuchs, mit dem wir demonstrieren, dass unser Sensor auch solche Prozesse perfekt erfassen kann.

Außerdem haben wir unseren LDD für die Dehnungsmessung an kleinen Messobjekten weiterentwickelt. Der Sensor kann nun Dehnungen mit einer lateralen Auflösung von 2 mm messen. Wir stellen die entsprechende neue optische Struktur für kleine Messobjekte vor.

2. Grundlage

Unser LDD basiert auf zwei heterodyn in-plane LDV, wobei die beiden LDV eine gemeinsame einfallende sowie empfangene Strahlengang nutzen. Jedes LDV misst die in-plane Bewegung auf einem Messpunkt. Abb. 1 zeigt den optischen Aufbau des LDD. Als Lichtquelle wird eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von 1550 nm ausgewählt, wodurch bei einer Laserschutzklasse I (augensicher) zehnfach mehr Lichtleistung als bei sichtbarem Laser für einen sicheren Betrieb einer Laserschutzklasse II zugelassen werden kann. Der kollimierte Laserstrahl wird danach durch einen Polarisationsstrahlteiler in zwei Strahlen aufgeteilt (Strahl A und B). Der s-polarisierte (senkrecht zur Einfallsebene) Strahl A wird mittels Keilprismen direkt zur Messoberfläche abgelenkt. Ein $\lambda/4$ -Plättchen hinter den Keilprismen ändert die Polarisation der einfallenden Strahlen von linear zu zirkular. Somit enthalten die einfallenden Strahlen s-

und p-Polarisationskomponenten, so dass auch im Streulicht alle Polarisationskomponenten enthalten sind. Der p-polarisierte (parallel zur Einfallsebene) Strahl B wird erst mithilfe einer Bragg-Zelle um 40 MHz frequenzverschoben und dann zur Messoberfläche abgelenkt. Bevor beide Strahlen (A und B) auf die Messobjekte fallen, teilt ein nicht polarisierter Strahlteiler mit Prisma die einzelnen Strahlen zu zwei parallel einfallenden Strahlen (Strahl A zu A1 und A2, Strahl B zu B1 und B2) auf. Strahl A1 und B1 überlagern sich auf der Messoberfläche und erzeugen ein Interferenzstreifenmuster, das den ersten Messpunkt definiert. In ähnlicher Weise überlagern sich die Strahlen A2 und B2 und definieren den zweiten Messpunkt. Alle vier Strahlen werden mittels Objektivs auf der Messoberfläche fokussiert, um eine hohe Lichtintensität zu erhalten.

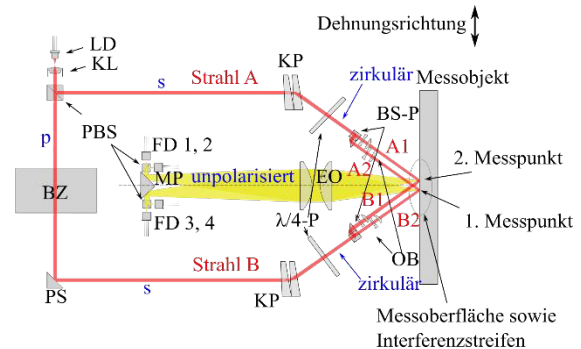


Abb. 1: Schematische Darstellung des optischen Aufbaus des LDD.

Hierbei bedeuten LD: Laserdiode, KL: Kollimator, KP: Keilprisma, PBS: polarisierende Strahlteiler, BS-P: Strahlteiler mit Prisma, BZ: Bragg-Zelle, FD: Fotodiode, MP: Prisma-Spiegel mit Messerkanten, EO: Empfangsoptik, $\lambda/4$ -P: $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte, OB: Objektiv und PS: Prisma-Spiegel. Die Polarisationszustände sind in blau gezeichnet.

Für jeden Messpunkt kreuzen sich zwei einfallende Laserstrahlen, die die gleiche Intensität und Polarisation haben, unter einem Winkel (als Kreuzungswinkel θ bezeichnet) auf der Messoberfläche. Ein Interferenzstreifenmuster mit Hell-Dunkel-Übergang wird erzeugt. Der Streifenabstand d wird durch die Wellenlänge λ und den Kreuzungswinkel θ mit der Formel

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1)$$

berechnet. Wenn sich ein Streukörper (Laserspeckle) der Oberfläche relativ zu den Streifen bewegt, ist die Frequenz der Intensitätsmodulation des Streifenmusters proportional zu der Bewegungsgeschwindigkeit

senkrecht zu den Streifen und die Phase entspricht der Auslenkung. In der Regel bewegen sich mehrere Streukörper durch den Streifen und bilden ein zeitabhängiges Specklemuster.

Ein Linsensystem erfasst das Streulicht aus beiden Messpunkten. Das Licht von jedem Messpunkt wird auf den Fotodetektor abgebildet. Die Bragg-Zelle verschiebt die Frequenz von einem einfallenden Strahl von 40 MHz und die Streifen oszillieren mit einer Frequenz von 40 MHz. Diese Frequenz wird als Trägerfrequenz f_c bezeichnet und erzeugt eine Intensitätsmodulation an jedem Punkt der Messoberfläche. Die momentane Frequenz des Detektorsignals $f_i(t) = d\phi_i(t)/dt$ erhöht sich bei einer den bewegenden Interferenzstreifen entgegenlaufenden Oberfläche und verringert sich, wenn sich die Messoberfläche mit den Streifen bewegt. Die in-plane Geschwindigkeit jedes Messpunkts $v_i(t)$ ist proportional zur der Dopplerfrequenzverschiebung (die Differenz zwischen der Frequenz des Detektorsignals und der Trägerfrequenz) durch

$$v_i(t) = d(f_c - f_i(t)), \quad (2)$$

mit d aus Formel (1). Die Auslenkung jedes Messpunkts $s_i(t)$ kann durch die Phase der Intensitätsmodulation $\phi_i(t)$ (Integration von Dopplerfrequenzverschiebung) bestimmt werden. Die gemessene Dehnung $\varepsilon(t)$ kann dann mithilfe der Differenzauslenkung zwischen beiden Messpunkten durch

$$\varepsilon(t) = \frac{s_1(t) - s_2(t)}{l} = \frac{d}{2\pi l} (\phi_1(t) - \phi_1(t_0) - \phi_2(t) + \phi_2(t_0)) \quad (3)$$

berechnet werden, wobei l der Abstand zwischen den beiden Messpunkten ist. Die Anfangsphasen $\phi_1(t_0)$ und $\phi_2(t_0)$ beschreiben den Zustand des Messobjekts zu Beginn der Messung.

Um die Einflüsse des Specklerauschens und von Signalaussetzern zu reduzieren, haben wir bei unserem LDD Signaldiversität implementiert [2, 3]. Das von jedem Messpunkt gestreute Licht durchläuft einen Polarisationsstrahlteiler, so dass jede Polarisationskomponente (s- und p-Polarisation) von einem einzelnen Fotodetektor erfasst werden kann. Insgesamt gibt es vier Detektoren. Der erste Fotodetektor (FD1 in Abb. 1) empfängt das p-polarisierte Licht und der zweite Detektor (FD2 in Abb. 1) erfasst das s-polarisierte Licht des ersten Messpunkts. Der dritte und vierte Detektor (FD3 in Abb. 1 für das p-polarisierte Licht und FD4 in Abb. 1 für das s-polarisierte Licht) erfassen das Streulicht des zweiten Messpunkts. Die Messsignale von

beiden Detektoren aus einem Messpunkt werden digitalisiert und dann mit Maximum-Ratio-Kombination (MRC) [16, 17] kombiniert und Quadratur-demoduliert (IQ-demoduliert) [18, 19].

Die gesamte optische Struktur mit Polarisationsdiversität und die erforderlichen elektrischen Platinen wurden in ein kompaktes Gehäuse (ca. 300 mm x 200 mm x 250 mm, L x B x H) integriert.

3. Dehnungsmessung in Hochgeschwindigkeitszugversuch

3.1 Experimentelle Setup

Unser LDD wurde in einem Hochgeschwindigkeitszugversuch eingesetzt, wobei der schematische Versuchsaufbau in Abb. 2 gezeigt wird.

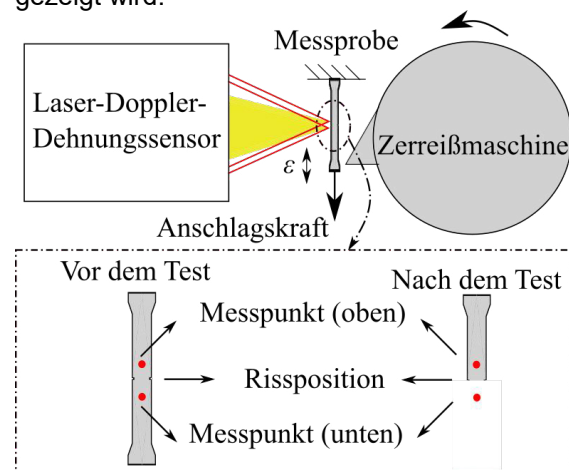


Abb. 2: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus des Hochgeschwindigkeitszugversuchs.

Die Zugversuchsanlage beschleunigt ein schweres Schwungrad bis zu einer Bahngeschwindigkeit von 30 m/s. Durch das Ausschlagen eines Ankereslements kann die gespeicherte Energie von dem Schwungrad instantan auf eine bis dahin ruhende Messprobe (wie in Abb. 3) übertragen werden, die dann in unter einer Millisekunde mit 30 m/s zerreißt. Der obere Teil der Probe ist befestigt und der untere Teil wird mit Anker verbindet. In der Mitte von der Probe wird eine Kerbe gefräst, somit wird sie in dieser Position gerissen.

Unser LDD steht vor der Messprobe. Die beiden Messpunkte liegen auf der gegenüberliegenden Seite der Rissposition. Der Abstand l zwischen den beiden Messpunkt beträgt 10 mm. Die Differenzauslenkung zwischen dem abgerissenen Teil und dem verbleibenden Teil werden gemessen.



Abb. 3: Messprobe mit Ankerelement.

Das Messsignal wird in dem Versuch zuerst mit einer Hochgeschwindigkeits-Datenerfassungskarte mit einer Abtastrate von 250 MHz digitalisiert und in den PC gespeichert. Die Datenauswertung findet erst nach dem Versuch statt.

Wie in Kapitel 2 erläutert, ist das Detektorsignal des LDD ein frequenzmoduliertes (FM) / phasenmoduliertes (PM) Signal mit einer Trägerfrequenz von 40 MHz. Die maximale zumessende Geschwindigkeit beträgt 30 m/s. Aus Formel (2) kann die maximale Doppelfrequenzverschiebung sowie die minimale Frequenz $f_{i,min}$ des Detektorsignals bestimmt werden. Mit dem Streifenabstand $d = 3,3 \mu\text{m}$ beträgt $f_{i,min}$ 9,1 MHz. Somit liegt die Signalbandbreite zwischen 30,9 MHz und 40 MHz. Ein entsprechender digitaler Bandpassfilter wird verwendet, um das Rauschen außerhalb dieser Bandbreite auszufiltern. Abb. 4 zeigt den gesamten Versuchsaufbau.

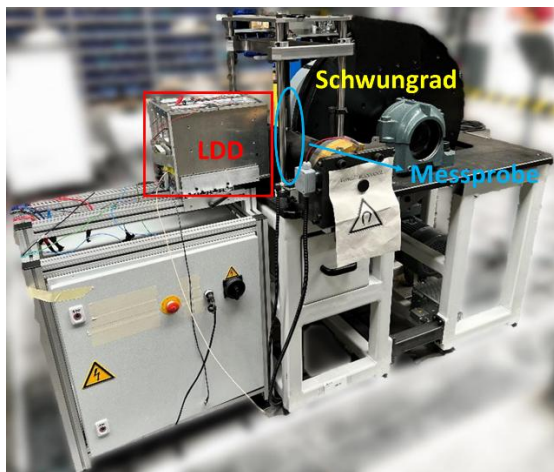


Abb. 4: Foto des Versuchsaufbaus von Hochgeschwindigkeitszugversuch.

Außerdem wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera (CR3000x2) in dem Versuch verwendet, um den Messergebnissen von unserem LDD vergleichen zu können. Die

Kamera fotografiert die Messstelle während des Rissvorgangs mit einer Abtastrate über 4000 Bildern/s.

3.2 Messergebnisse

In diesem Teil werden die Messergebnisse von unseren LDD und der Hochgeschwindigkeitskamera aus unserem ersten Zerreitest dargestellt und analysiert. Wir haben mehrere Zugversuche durchgeführt und insgesamt zwei Arten von Proben verwendet, nämlich Aluminium und Stahl (wie in Abb. 5 dargestellt).



Abb. 5: Messprobe von Zugversuchen.

Abb. 6 zeigt die Messergebnisse unseres LDD aus einem der durchgefhrtten Zugversuche, wobei vier Zeitpunkte (Frame 1, 2, 3, und 4) gezeichnet werden. Diese vieren Zeitpunkte entsprechen den aufgenommenen Bildern von dem Referenzmesssystem (Kamera) (die Bilder sind in Abb. 7 dargestellt). Im Abschnitt Frame 2-3 scheint die Probe noch nicht vollständig zerrissen zu sein, sondern auf ihrer vollen Länge gedehnt zu werden, sodass sich zwischen den beiden Messpunkten des Sensors eine geringere Differenzgeschwindigkeit ergibt. Auf dem Abschnitt Frame 3-4 kann die Probe als abgerissen betrachtet werden, hierdurch tritt die volle Zerreigeschwindigkeit als Differenzgeschwindigkeit zwischen den Messpunkten ein. Die rote Linie zeigt eine Differenzgeschwindigkeit von 30,07 m/s, was einer Abrissgeschwindigkeit von 30 m/s entspricht. Nach der Zeit von ca. 41 ms (in Abb. 6) verlässt das abgerissene Probenteil den Messbereich des LDD. Natürlich ist der Beobachtungsbereich der Kamera größer als der Messbereich des LDD. So wird die Kurve des LDD nur bis zu 7,1 mm abgesenkt, während mit der Kamera noch eine Differenzauslenkung von 9,08 mm erkennbar ist.

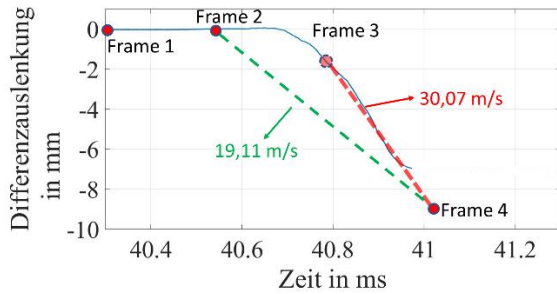


Abb. 6: Messergebnis des LDD bei dem Hochgeschwindigkeitszerreißtest. Die Verbindungsgerade zwischen dem Abschnitt von Frame 3 und 4 lassen sich zu Schätzung der mittleren Geschwindigkeiten in diesen Intervallen nehmen.

Abb. 7 zeigt die Beobachtung der gleichen Abreißvorgänge der Probe mit der Hochgeschwindigkeitskamera wie in Abb. 6. In der Aufnahmeserie wurde versucht, anhand einer bekannten Referenzlänge die Geschwindigkeit des innerhalb von wenigen Abbildungen erfolgenden Abreißvorgangs zu bestimmen. Die Serie wurde mit 4201 Fps aufgenommen, es erfolgte alle 0,238 ms eine Bildaufnahme. Im ersten Frame wird die Probe in der Prüfmaschine vor dem Beginn des Zerreißversuchs gezeigt. Im zweiten Foto hat der Abreißvorgang noch nicht begonnen. Deshalb sind die beiden Punkte (Frame 1 und 2) in Abb. 6 auf 0 mm. Im dritten Foto (ein Frame später) ist schon eine leichte Bewegung des unteren Probenteils erkennbar. Aber kann die Auslenkung wegen begrenzter Auflösung der Kamera nicht genau bestimmt werden. Deshalb wird der Punkt von Frame 3 in Abb. 6 als den Punkt auf der blauen Kurve mit dem gleichen Zeit-Achse-Wert gezeichnet. Das Zeitintervall, in welchem der abgerissene Teil der Probe eine Strecke von 9,08 mm zurückgelegt hat, wie im vierten Foto zu erkennen, beträgt 0,476 ms (Im Bezug zu Frame 2). Somit ergibt es sich aus diesen Aufnahmen rechnerisch eine mittlere Geschwindigkeit zwischen Frame 2 und 4 von 19,08 m/s. Dieser Wert passt gut zu der mit dem LDD gemessenen Geschwindigkeit von 19,11 m/s (die grüne Linie in Abb. 6). Dieses optische Verfahren gelangt, trotz einer Bildrate von über 4 kHz, aufgrund der Kürze des Zeitintervalls und die begrenzte Pixelzahl an seine Auflösungsgrenze. Es ergibt sich die gezeigte Unschärfe für die bestimmte Geschwindigkeit in dem ganzen Rissprozess. Im Gegensatz dazu zeigt sich die Ergebnisse aus unserem LDD in Abb. 6, dass der Sensor sehr genau die eingestellte Zerreißgeschwindigkeit aufzeichnen konnte.

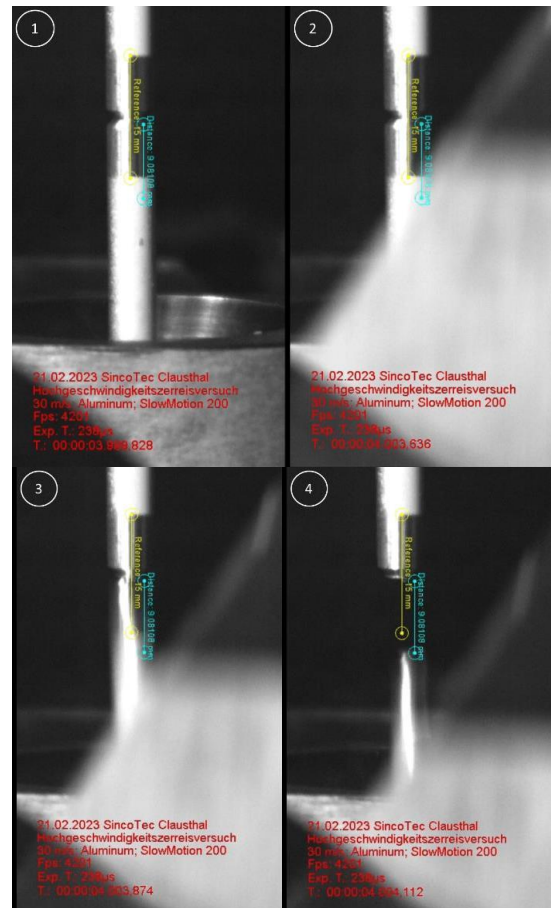


Abb. 7: Messergebnisse der Hochgeschwindigkeitskamera. Der Zeitabstand zwischen den aufgenommenen Bildern beträgt 238 μ s.

4. Dehnungsmessung bei kleinem Messobjekt

Im vorigen Kapitel wurde ein Beispiel für die Dehnungsmessung in einem Hochgeschwindigkeitszugversuch vorgestellt. Der Abstand l zwischen den beiden Messpunkten betrug 10 mm und war relativ groß. Wir haben auch das optische Design des LDD weiterentwickelt, wodurch ein kleineres l (bis zu 2 mm) realisiert werden kann. Damit kann der Sensor die Dehnung mit einer lateralen Auflösung von 2 mm messen. Der optische Aufbau in Abb. 1 ist für ein großes l (>5 mm) geeignet. Bei $l < 5$ mm kann das Streulicht der beiden Messpunkte nicht durch das Messerkantenprisma getrennt werden (wie in Abb. 8). Dies bedeutet, dass das Licht des einen Messpunktes auch vom Photodetektor des anderen Messpunktes erfasst wird. Das Messsignal des einzelnen Messpunktes wird also durch die Bewegung des anderen Messpunktes beeinflusst.

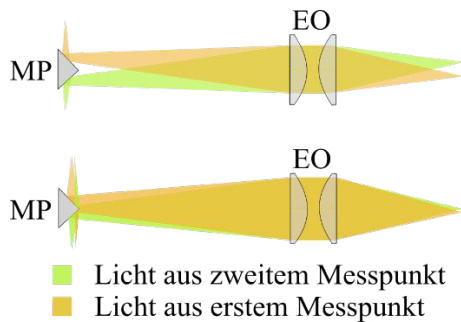


Abb. 8: Schematische Darstellung des Empfangslichtgangs mit größerer l (oben) und mit kleinerer l (unten). Hierbei ist MP Prisma-Spiegel mit Messerkanten und EO ist Empfangsoptik.

Wir haben zwei Lösungen für dieses Problem untersucht. Bei der ersten Lösung bleiben die meisten Teile der bisherigen optischen Struktur (wie in Abb. 1) unverändert. Nur die Empfangsoptik wird aktualisiert (wie in Abb. 9). Die Brennweite der Empfangsoptik wird so angepasst, dass das Streulicht von beiden Messpunkten bis zum Prismenspiegel getrennt wird (MP in Abb. 9). Um die veränderte Brennweite der Empfangsoptik zu kompensieren, müssen natürlich zwei zusätzliche Fokuslinsen und ein größerer Prismaspiegel verwendet werden.

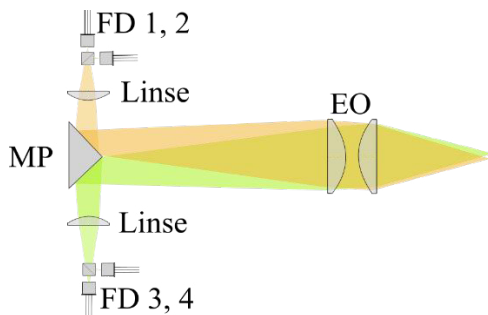


Abb. 9: Verbesserte optische Struktur (Lösung 1). Hierbei ist FD Fotodetektor.

Obwohl die Änderung der optischen Struktur gering ist, benötigen die längere Brennweite und die zusätzlichen Optiken mehr Platz. Dies bedeutet, dass das gesamte LDD etwa 100 mm länger und 50 mm breiter sein muss.

Daraufhin wurde eine zweite Lösung entwickelt. Hier wird nicht nur die Empfangsoptik geändert, sondern auch die Einfallsoptik (wie in Abb. 10). Bei diesem Aufbau benutzen das einfallende und das empfangene Licht unterschiedliche Strahlengänge für die beiden Messpunkte, während es beim vorherigen Aufbau nur einen gemeinsamen Strahlengang gibt. Ähnlich wie

in Abb. 1 sind auch hier die Polarisationszustände in Blau dargestellt.

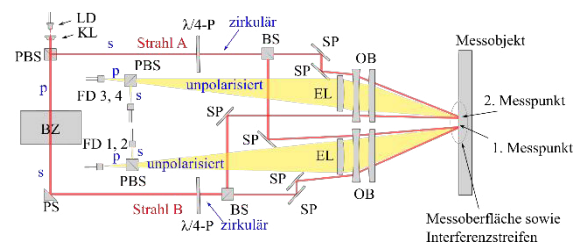


Abb. 10: Verbesserte optische Struktur (Lösung 2). Hierbei sind EL Empfangslinse, SP Spiegel. Sonstige Abk. sowie Beschreibung in dem Bild sind gleich wie in Abb. 1.

Obwohl diese Verbesserung viel mehr Änderungen erforderte als in Abb. 9 gezeigt werden und den Sensor komplexer macht, hat sie auch einige Vorteile. Verglichen mit der Struktur in Abb. 1 und 9 werden nur wenige und kostengünstige optische Teile verwendet. Außerdem kann die Umsetzung dieser Struktur in einem kompakten Gehäuse wie in Abb. 1 realisiert werden, während die Lösung in Abb. 9 ein größeres Gehäuse erfordert. Der dritte Vorteil ist, dass das einfallende und das empfangene Licht dieselbe Linse durchlaufen. Dadurch lässt sich eine Autofokusfunktion leicht realisieren. Die Fokuslänge (der Arbeitsabstand des LDD) kann durch Verstellen des Objektivs eingestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Struktur ein noch kleineren Messpunktabstand l ermöglicht ($l < 2 \text{ mm}$).

Die Erforschung der beiden in Abb. 9 und 10 gezeigten Verbesserungsmöglichkeiten ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Wir werden uns weiterhin darauf konzentrieren, die optimale Struktur für die Dehnungsmessung auf dem kleinen Messobjekt zu finden.

5. Zusammenfassung

In diesem Artikel haben wir die Weiterentwicklung unseres LDD vorgestellt. Der Dehnungssensor kann die Dehnung im Hochgeschwindigkeitszugversuch messen, bei dem die Messprobe aus dem Stillstand auf bis zu 30 m/s in unter einer Millisekunde beschleunigt und zerrissen wird. Verglichen mit dem Referenzmesssystem, eine Hochgeschwindigkeitskamera, bietet unser LDD eine viel höhere Bandbreite und eine viel bessere Genauigkeit. Daher ist unser LDD ein ideales Messsystem für solche Hochgeschwindigkeitszugversuche, wohingegen die herkömmlichen Messmethoden bei solchen Anwendungen nicht gut funktionieren. Es wurden auch zwei neue

optische Linsenordnungen erforscht. Damit kann die Dehnung an einem kleinen Messobjekt (2 mm) gemessen werden.

Literaturnachweis

- [1] F. Wang, S. Krause, J. Hug, C. Rembe, A Contactless Laser Doppler Strain Sensor for Fatigue Testing with Resonance-Testing Machine, *Sensors* 21, 1, 319 (2021); doi: 10.3390/s21010319
- [2] F. Wang, S. Krause, C. Rembe, Signal diversity for the reduction of signal dropouts and speckle noise in a laser-Doppler extensometer, *Measurement: Sensors* 22, 100377 (2022); doi: 10.1088/1742-6596/2698/1/012020
- [3] F. Wang, C. Rembe, Statistical behaviour of laser Doppler vibrometer detector signals and application of statistics for signal diversity, *Journal of Physics: Conference Series* 2698, 012020 (2024); doi: 10.1088/1742-6596/2698/1/012020
- [4] M. Schewe, C. Rembe, Signal Diversity for Laser-Doppler Vibrometers with Raw-Signal Combination, *Sensors* 21, 3, 998 (2021); doi: 10.3390/s21030998
- [5] C. Rembe, S. Boedecker, A. Dräbenstedt, F. Pudewills, G. Siegmund, Heterodyne laser-Doppler vibrometer with a slow-shear-mode Bragg cell for vibration measurements up to 1.2 GHz, in *Proc. SPIE 7098, Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, 70980A (2008); doi: 10.1117/12.802930
- [6] A. Carlini, A. Rivola, G. Dalpiaz, A. Maggiore, Valve motion measurements on motorbike cylinder heads using high-speed laser vibrometer, *Proc. SPIE 4827, Fifth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, (22 May 2002); doi:10.1117/12.468175
- [7] K. Ueda, A. Umeda, Dynamic response of strain gages up to 300 kHz, *Experimental Mechanics* 38, 93-98 (1998); doi: 10.1007/BF02321650
- [8] D. Zhu, B. Mobasher, S.D. Rajan, Non-contacting strain measurement for cement-based composites in dynamic tensile testing, *Cement and Concrete Composites* 34, 2, 147-155 (2012); doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.011
- [9] J. Seidt, V.T. Kuokkala, J. Smith, A. Gilat, Synchronous Full-Field Strain and Temperature Measurement in Tensile Tests at Low, Intermediate and High Strain Rates. *Exp Mech* 57, 219-229 (2017); doi: 10.1007/s11340-016-0237-z
- [10] Q. Ma, M.R.M. Rejab, Q. Halim, M.N.M. Merzuki, M.A.H. Darus, Experimental investigation of the tensile test using digital image correlation (DIC) method. *Materials Today: Proceedings* 27, 2, 757-763 (2020); doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.072
- [11] D. Li, B. Cheng, S. Xiang, H. Zhou, Integrative measurement method for tensile test based on DIC using modified second-order shape function, *Measurement* 226, 114098 (2024); doi: 10.1016/j.measurement.2023.114098
- [12] N. Mashiwa, T. Furushima, K. Manabe, Novel Non-Contact Evaluation of Strain Distribution Using Digital Image Correlation with Laser Speckle Pattern of Low Carbon Steel Sheet, *Procedia Engineering* 184, 16-21 (2017); doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.065
- [13] Q. Zheng, N. Mashiwa, T. Furushima, Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles, *Materials & Design* 191, 108626 (2020); doi: 10.1016/j.matdes.2020.108626
- [14] C. M. Penney, Differential Doppler Velocity Measurements, *Appl. Phys. Lett.* 16, 4, 167-169 (1970); doi: 10.1063/1.1653147
- [15] H. D. v. Stein, H. J. Pfeifer, A Doppler Difference Method for Velocity Measurements, *Metrologia* 5, 2, 59-61 (1969); doi: 10.1088/0026-1394/5/2/006
- [16] A. Tsiatmas, F. M. J. Willems, S. Baggen, Optimum diversity combining techniques for visible light communication systems, *IEEE Globecom Workshops*, 456-461 (2014); doi: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063474
- [17] D. Smith, T. Abhayapala, Maximal ratio combining performance analysis in practical Rayleigh fading channels, *IEE Proceedings - Communications* 153, 5, 755-761 (2005); doi: 10.1049/ip-com:20050222
- [18] C. Rembe, G. Siegmund, H. Steger, M. Wörtge, Measuring MEMS in Motion by Laser Doppler Vibrometry, in *Optical Inspection of Microsystems*, 2 Hrsg., Boca Raton, CRC Press 246-292 (2019); doi: 10.1201/9781420019162.ch9
- [19] K. Ho, Y. Chan, R. Inkol, A digital quadrature demodulation system, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 32, 4, 1218-1227 (1996); doi: 10.1109/7.543843