

Adaptiver Laser-Doppler-Distanzsensor mit erweitertem Messbereich durch Einsatz einer Linse mit elektrisch veränderlicher Brennweite

R. Kuschmierz, C. Linde, T. Pfister, L. Büttner, J. Czarske

Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik; Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik, Professur für Mess- und Prüftechnik; Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden; Tel.-Nr.: +49 351 463-37657; E-Mail: robert.kuschmierz@tu-dresden.de; Fax: +49 351 463-37716

Motivation

In der Prozessmesstechnik existiert eine große Bandbreite optischer Sensoren für Distanzmessungen an technischen Oberflächen. Da diese nichtinvasiv arbeiten, eignen sie sich insbesondere für die Messung an bewegten Objekten. Die Messbereichslänge sowie der Arbeitsabstand sind dabei durch den Aufbau des Messkopfes gegeben. Sollen mit einem Sensor Messaufgaben ausgeführt werden, deren geforderte Messbereichslängen sich stark unterscheidenden, so ist ein Sensor mit der größten notwendigen Messbereichslänge zu wählen. Da für eine Vielzahl der zu Grunde liegenden Messprinzipien die Ortsauflösung näherungsweise proportional zur Messbereichslänge ist, erhöht sich damit die Messunsicherheit für Messaufgaben, bei denen nicht der volle Messbereich genutzt wird, unnötig. Ändert sich der notwendige Arbeitsabstand um einen Wert größer als die Messbereichslänge, so ist der Sensor oder das Messobjekt zu traversieren. Die Alternative des Einsatzes verschiedener, auf die jeweilige Aufgabe angepasster Messköpfe kann sehr kostspielig sein und ist zeitaufwendig. Ein Lösungsansatz, um den Arbeitsabstand bzw. die Messbereichslänge der jeweiligen Aufgabe anzupassen, ist der Einsatz von Linsen mit variabler Brennweite. Lässt sich der Arbeitsabstand des Sensors schnell und präzise genug der Oberflächenposition nachführen, so können Oberflächen mit Positionsänderungen größer der eigentlichen Messbereichslänge vermessen werden. Die Messbereichslänge wird also künstlich erhöht, ohne die Ortsauflösung zu beeinträchtigen. Die Erweiterung optischer Messsysteme mit adaptiven Linsen soll in diesem Beitrag am Laser-Doppler-Distanzsensor (LDD) demonstriert werden. Der LDD eignet sich insbesondere zur Vermessung von Position und Geschwindigkeit schnell bewegter, rauer Oberflächen und findet so beispielsweise Anwendung in der Formvermessung oder bei der Schwingungsanalyse schnell rotierender Körper.

Überblick zu adaptiven Linsen

Adaptive Linsen können unter Ausnutzung verschiedener physikalischer Effekte realisiert werden. Dabei kann die Brennweite über den Abstand von Linsen zueinander, die Brechzahl des Linsenmaterials oder den Krümmungsradius der Linsenoberfläche geändert werden. Es gibt verschiedene Realisierungen adaptiver Linsen, von denen einige im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Beim Zoomobjektiv werden die Linsen axial zueinander verschoben und so die effektive Brennweite des Linsensystems beeinflusst. Im Allgemeinen sind Zoomobjektive verhältnismäßig groß und schwer gegenüber einer einzelnen Linse. Dafür besitzen sie hochwertige Abbildungseigenschaften und können große Aperturen erreichen. Die Dauer der Änderung der Brennweite beträgt einige hundert Millisekunden bis hin zu mehreren Sekunden.

Alvarez-Humphrey-Linsen bestehen aus einem Linsenpaar, deren einander zugewandte Oberflächen polynomial geformt, konjugiert, rotationsasymmetrisch und asphärisch sind. Anders als bei Zoomobjektiven wird die Brennweitenänderung hier durch eine laterale Verschiebung der Linsen erreicht [1, 2] Die Brennweitenänderung, die auf diese Weise erzielt werden kann, ist im Vergleich zu anderen Verfahren relativ gering.

Flüssigkristalllinsen stellen einen Vertreter von adaptiven Linsen dar, bei denen die Brennweitenänderung durch die Änderung der Brechzahl des Linsenmaterials erfolgt. Durch Anlegen eines speziell geformten elektrischen Feldes werden dabei doppelbrechende Flüssigkristalle ausgerichtet, die einen Brechungsindexgradienten erzeugen. Auf diese Weise lassen sich Brennweitenänderungen von 0,5 m bis unendlich realisieren [3, 4]

Elektrobenetzungslinsen (engl. electrowetting) wurden für den Einsatz in Unterhaltungs- und Kommunikationsgeräten wie Handykameras entwickelt. Dabei befinden sich zwei unmischbare Flüssigkeiten (meist Öl und Wasser) mit unterschiedlichen Brechungsindizes zwischen zwei Elektroden. Eine Elektrode ist hydrophob beschichtet. Durch die Stärke der angelegten Spannung ändert sich der Benetzungswinkel und damit der Krümmungsradius zwischen den Flüssigkeiten. Bisher wird dieses Prinzip nur für kleine Tropfen beherrscht. Demzufolge sind die freien Aperturen mit wenigen Millimetern

noch sehr gering. Es können Brennweiten von 10 cm bis unendlich in wenigen 10 ms eingestellt werden [5-7].

Bei Fluidlinsen befindet sich eine Flüssigkeit hinter einer Membran. Flüssigkeit und Membran bilden eine plankonvexe, sphärische Linse. Erhöht man das Flüssigkeitsvolumen hinter der Membran, so wölbt sich diese weiter nach außen, der Krümmungsradius sinkt und die Brennweite der Linse verkürzt sich. Die Änderung des Flüssigkeitsvolumens kann auf unterschiedliche Art und Weise beispielsweise chemisch erfolgen [8]. Wesentlich häufiger wird die Flüssigkeit mechanisch verdrängt. Dabei können unter anderem Piezoaktoren, Mikropumpen oder thermische Prozesse genutzt werden [9-11]. Fluidlinsen lassen sich im Gegensatz zu den zwei zuvor genannten adaptiven Verfahren leichter skalieren. So sind Linsen mit Aperturen bis 10 mm und Brennweiten, die von 20 bis 120 mm einstellbar sind, erhältlich. Dabei werden typischerweise Einstellzeiten ab 10 ms erreicht [12].

Der Laser-Doppler Distanzsensoren (LDD) mit adaptiver Linse

Das LDD stellt eine Erweiterung des konventionellen Laser-Doppler-Velozimeters (LDV) dar, mit dem neben der lateralen Geschwindigkeit v_x auch die axiale Position z bewegter Oberflächen bestimmt werden kann. Dazu werden zwei Paare von kohärenten Laserstrahlen in einem Punkt gekreuzt. Dabei wird das eine Strahlenpaar vor und das andere hinter den Kreuzungspunkt fokussiert, so dass entlang der optischen Achse ein divergentes und ein konvergentes Interferenzstreifensystem $d_{1,2}(z)$ gebildet werden. Die an rauen Oberflächen gestreuten Lichtanteile sind dementsprechend mit den Frequenzen $f_{1,2}(z)=d_{1,2}(z) \cdot v_x$ moduliert. Aus dem Quotienten $q(z)=f_1(z)/f_2(z)$ lässt sich somit die Oberflächenposition und aus Position, Frequenz und Streifenabstand die Geschwindigkeit bestimmen [13].

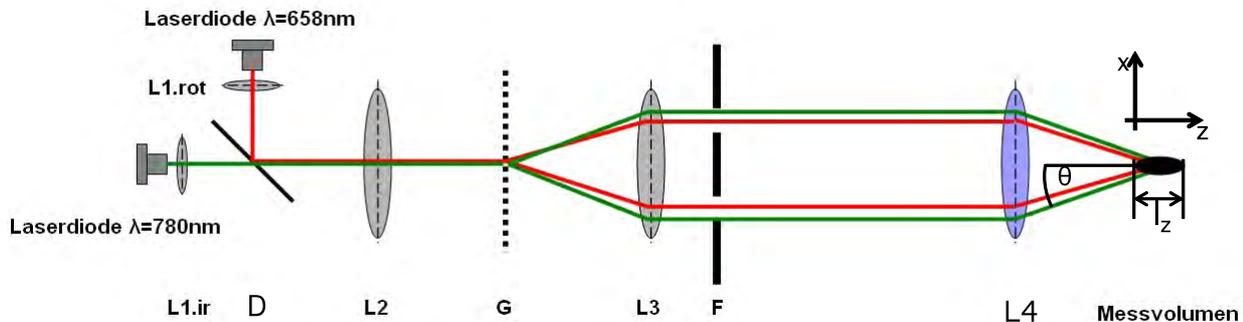


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines LDD: mit Laserdioden, den Asphären L1.rot, L1.ir, Dichroitischen Spiegel D, Linse L2, Gitter G, Linse L3, Strahlfalle F und der Frontlinse L4.

In Abb. 1 ist der optische Aufbau der Lichtsendeeinheit des LDD schematisch dargestellt. Das Licht zweier Laserdioden wird von den Asphären L1.rot bzw. L1.ir kollimiert und mit Hilfe des dichroitischen Spiegels D vereint. Von einer Linse L2 wird es auf das Gitter G fokussiert. Die ± 1 . Beugungsordnungen werden über das Teleskop von Linse L3 und der Frontlinse L4 im Messvolumen überlagert. Alle weiteren Beugungsordnungen werden mittels Strahlfalle F geblockt. Eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise des LDD findet sich in [13]. Das Gitter G befindet sich dabei in der Brennebene von Linse L3, so dass die Teilstrahlen im Teleskop parallel zur optischen Achse verlaufen. Die Position des Messvolumens, also der Arbeitsabstand ist damit durch die Brennweite der Frontlinse L4 gegeben. Diese ist nun eine adaptive Linse, um den Arbeitsabstand der jeweiligen Messsituation anzupassen.

Die Messvolumenlänge l_z des LDD ist abhängig vom Kreuzungswinkel θ der Teilstrahlen. Je geringer der Kreuzungswinkel θ ist, desto länger wird das Messvolumen $l_z \sim 1/\sin(\theta)$. Allerdings hängt auch die Messunsicherheit der Position σ_z direkt proportional von der Messvolumenlänge ab $\sigma_z \sim l_z$. Daher wird angestrebt, ein möglichst kurzes Messvolumen mit einer geringen Messunsicherheit mit Hilfe der adaptiven Linse zu verschieben und den effektiven Messbereich so stark zu vergrößern. Für einen möglichst großen Kreuzungswinkel der Teilstrahlen, bei gleichzeitig großem Bereich, über den der Arbeitsabstand variiert werden kann, müssen die Teilstrahlen im Teleskop einen möglichst großen Abstand zur optischen Achse aufweisen. Demnach ist eine adaptive Frontlinse mit einem großen Einstellbereich der Brennweite und gleichzeitig großer freier Apertur notwendig. Aus diesem Grund wurde eine Fluidlinse gewählt, da diese, abgesehen von Zoomobjektiven und Alvarez-Humphrey Linsen, die größte Apertur der adaptiven Optiken aufwies und vergleichsweise einfach anzusteuern ist. Eingesetzt wurde die Linse *EL-10-30* von der Fa. *Optotune*. Sie hat eine freie Apertur von 10 mm und kann

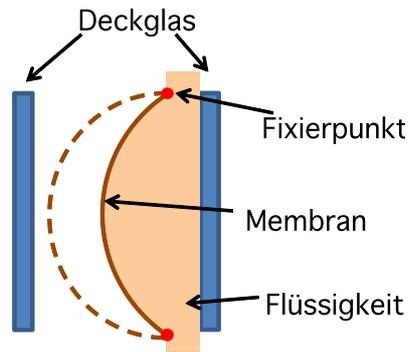


Abb. 2: Schematisch Darstellung des Funktionsprinzips der Fluidlinse

Brennweiten von 45 bis 125 mm einstellen. In Abb. 2 ist ihr schematischer Aufbau im Querschnitt dargestellt. Zu erkennen sind die beiden Deckgläser und die Membran, die durch die Flüssigkeit verformt wird. Dazu wird ein Permanentmagnet vom Magnetfeld einer Spule in ein Flüssigkeitsreservoir gedrückt. Die so verdrängte Flüssigkeit führt zu einer Wölbung der Membran.

Charakterisierung des Messaufbaus mit adaptiver Linse

Zur Steuerung der Brennweite wird ein Linsenstrom von 0 bis 400 mA angelegt. Aufbaubedingt befindet sich die Mitte des Messvolumens stets in der Fokusebene der Frontlinse. Der Wert der Kalibrierfunktion beträgt an dieser Stelle $q(z_0)=1$, so dass die Brennweite durch Kalibrierung der Streifensysteme in Abhängigkeit vom eingestellten Linsenstrom bestimmt werden kann. Der Zusammenhang zwischen Strom und Brennweite ist in Abb. 3 aufgetragen. Es ist ein hyperbelartiger Verlauf der Kurve erkennbar. Je größer der Strom, der durch die Linse fließt, ist, desto größer ist die Wölbung der Membran und desto kürzer die Brennweite.

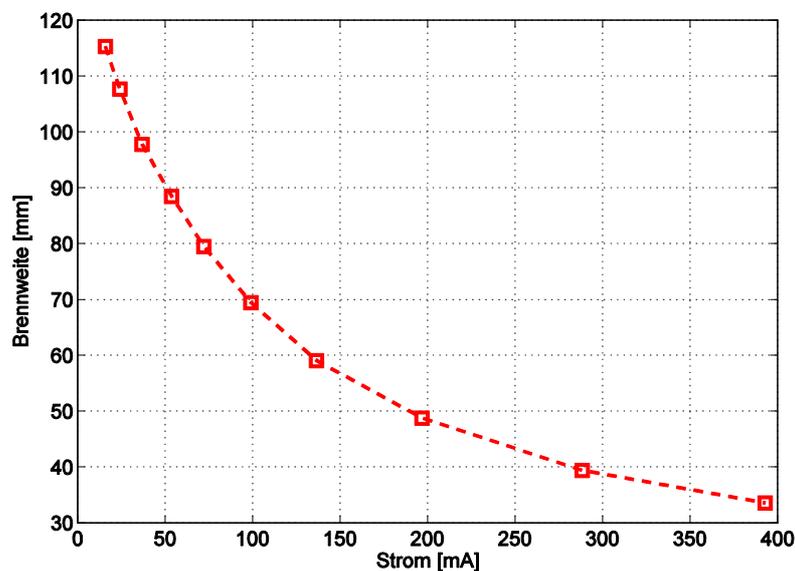


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Linsenstrom und Brennweite Brennweite. Höhere Ströme bedeuten kürzere Brennweiten.

Für eine erste Untersuchung wurde der Sensor für verschiedene eingestellte Brennweiten kalibriert. Dazu wird ein rotierender Schlitz mit bekannter lateraler Geschwindigkeit durch das Messvolumen bewegt und die lokalen Streifenabstände vermessen. Durch Verfahren des Schlitzes in axialer Richtung können die Streifenabstandsfunktionen $d_{1,2}(z)$ ermittelt werden. Dabei zeigte sich, dass die zufällige Messunsicherheit sowie die Messbereichslänge vergleichbar mit denen von LDD-Aufbauten mit Linsen fester Brennweiten waren (vgl. Abb. 4). Demnach kann die Fluidlinse grundsätzlich im LDD eingesetzt werden.

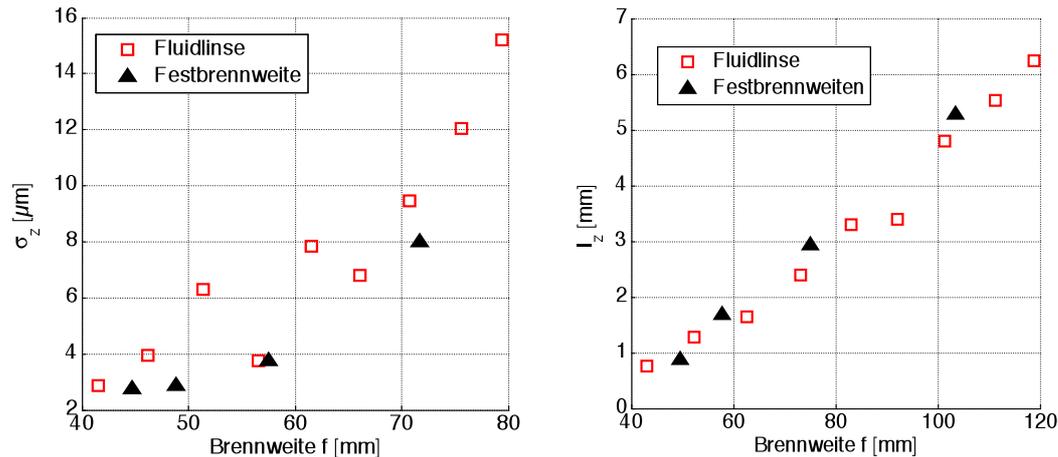


Abb. 4: Gegenüberstellung der Messunsicherheit und Messbereichslänge von Fluidlinse und Linsen fester Brennweiten.

Um schnell bewegten Oberflächen folgen zu können, ist es nicht nur wichtig zu wissen, welche Brennweiten erreicht werden können, sondern auch wie schnell sich diese einstellen lassen. Dazu wurde ein Teilstrahl des LDD auf einen stehenden Schlitz ausgerichtet. Dann wurde der Linsenstrom geändert, so dass sich der Fokus einen bestimmten Betrag vom ausgerichteten Zustand entfernte. Anschließend wurde der Strom wieder auf den ursprünglichen Wert gestellt und die Zeit gemessen, bis die Intensität hinter dem Schlitz 90% des ursprünglichen Wertes angenommen hatte. Diese Zeiten sind für unterschiedlich große Brennweitesprünge und Sprungrichtungen in Abb. 5 aufgetragen. Dabei fällt auf, dass mit steigender Sprungweite die Einschwingzeit zunimmt und vor allem richtungsabhängig ist. Eine Brennweitenänderung um 10 mm ist noch in weniger als 60 ms möglich. Für Vergrößerung der Brennweite um 55 mm benötigt man schon 120 ms und für eine Verkürzung um 55 mm sogar knapp 400 ms. Demnach dürfen Positionsänderungen der Oberfläche, bei denen das Messvolumen verlassen wird und nachgeregelt werden muss, nicht schneller erfolgen als die Reaktionszeit der Linse. So kann beispielsweise bei einem Drehprozess der Abtrag überwacht werden.

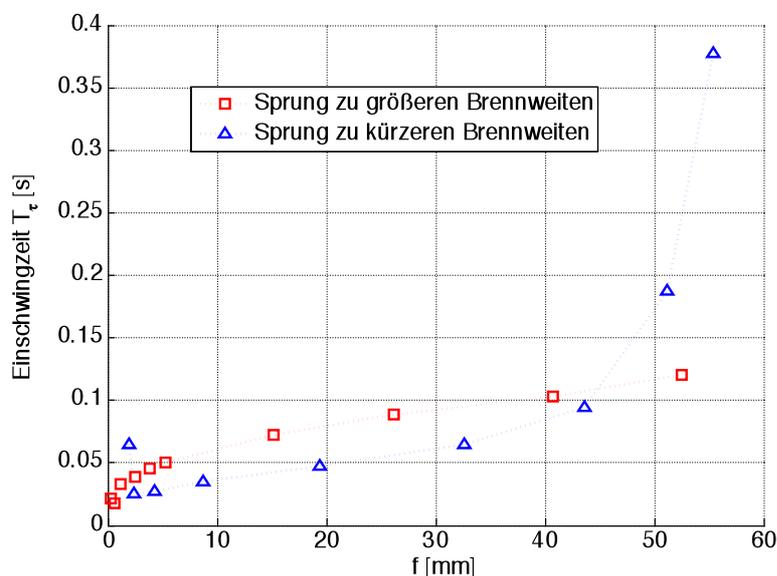


Abb. 5: Einschwingzeiten die von der Linse benötigt werden, um 90 % des Zielwertes zu erreichen.

Nachdem das Zeitverhalten der Linse in Abhängigkeit der Sprungweite eingeschätzt werden kann, ist von Interesse, wie gut die Reproduzierbarkeit dieser Sprünge ist. Dazu wurde ein vorgegebener Strom I_s eingestellt und der Sensor für diesen kalibriert. Anschließend wurde I_s mehrmals von verschiedenen Strömen aus angefahren. Durch Messung der Dopplerfrequenzen $f_{1,2}(z)$ konnte auf die Abweichung zwischen vorgegebener und erreichter Brennweite geschlossen werden. Dabei zeigt sich, dass die erreichte Brennweite ab Sprüngen größer 6 mm hauptsächlich von der Sprungrichtung abhängig ist. Wird die Brennweite aus der gleichen Richtung wie beim erstmaligen Einstellen von I_s angefahren, so zeigt

sich, dass die Brennweitendifferenz mit zunehmender Sprungweite steigt (vgl. Abb. 5). Dabei bleibt die Brennweitendifferenz stets kleiner $35 \mu\text{m}$. Beim Anfahren der Brennweite aus entgegengesetzter Richtung gibt es ab Sprungweiten größer 6 mm starke Abweichungen größer $800 \mu\text{m}$. Durch eine 30-malige Wiederholung der Messungen konnten die Standardabweichungen bestimmt werden. Diese betragen unabhängig von Sprunghöhe und -Richtung stets weniger als $25 \mu\text{m}$, so dass von systematischen Effekten ausgegangen werden kann. Möchte man eine bestimmte Brennweite anfahren, so sind diese zu berücksichtigen. Fehler lassen sich beispielsweise vermeiden, in dem Brennweiten stets nur von einer Richtung angefahren werden.

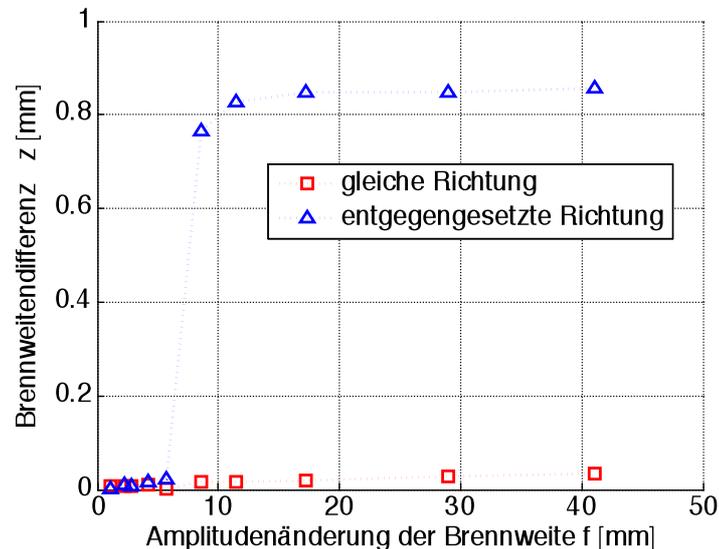


Abb. 6: Systematische Abweichungen bei der Einstellung einer Brennweite in Abhängigkeit von Richtung und Höhe des Brennweitesprungs (rot gleiche Richtung wie bei Vorgabe, blau entgegengesetzte Richtung).

Im Laufe der Untersuchungen wurde festgestellt, dass es neben der Sprungrichtung weitere Einflussfaktoren für die eingestellte Brennweite gibt. Durch aufzeichnen der Temperatur und Bestimmung der Brennweite mit Hilfe des Kalibrierschlitzes über einen langen Zeitraum konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperatur der Linse und der Brennweitenänderung festgestellt werden. Dieser ist in Abb. 7 dargestellt. Für den betrachteten Temperaturbereich änderte sich dabei die Brennweite um etwa $-250 \mu\text{m/K}$. Die Linsentemperatur änderte sich dabei aufgrund einer Änderung der Raumtemperatur. Es ist zu beachten, dass die Abszisse der Brennweitenänderung invertiert dargestellt wurde, um die direkte Abhängigkeit von der Temperatur zu verdeutlichen. Der Korrelationskoeffizient der beiden Kurven betrug über $0,99$, sodass andere Einflüsse als die Linsentemperatur ausgeschlossen werden können. Eine Erhöhung der Temperatur bewirkt somit eine Verkürzung der Brennweite. Dies ist auch insofern einleuchtend, da sich durch eine erhöhte Temperatur die Flüssigkeit in der Linse ausdehnt und dadurch die Membran stärker gekrümmt wird. Um zu zeigen, dass diese Änderungen ausschließlich von der adaptiven Linse kommen, wurde eine weitere Messreihe aufgenommen, bei der die adaptive Linse durch eine Linse fester Brennweite ersetzt wurde. Dort waren die Änderungen der Brennweite mit weniger als $-10 \mu\text{m/K}$ deutlich geringer, so dass die adaptive Linse als alleinige Ursache benannt werden kann. Der Einfluss der Temperatur ist brennweitenabhängig und verstärkt sich hin zu längeren Brennweiten. Soll die Fluidlinse in Messsystemen eingesetzt werden, so muss die Linse entweder temperaturstabilisiert oder die Linsentemperatur gemessen und die systematischen Abweichungen berücksichtigt werden.

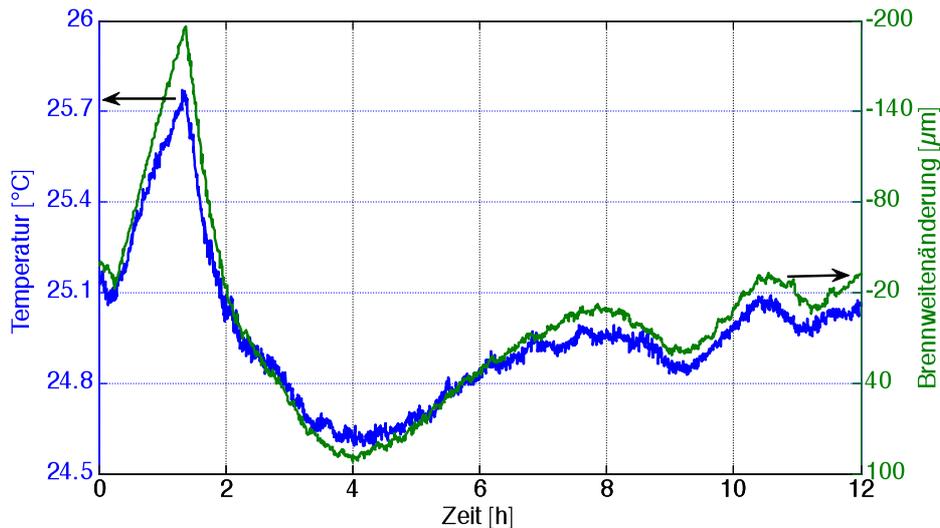


Abb. 7: Aufgezeichneter Temperaturverlauf der adaptiven Linse und die daraus resultierende Änderung der Brennweite. Die Änderung der Linsentemperatur wurde durch die Umgebungsluft hervorgerufen.

Bei der Aufnahme mehrerer Kalibrierkurven bei verschiedenen Brennweiten und anschließender Messung zeigten sich systematische Positionsabweichungen bis zu 300 μm , welche weder mit Temperaturschwankungen noch mit den bereits bestimmten Reproduzierbarkeitsfehlern erklärbar sind. Diese Abweichungen sind beispielhaft in Abb. 8 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Kurven an den Übergängen zwischen zwei Brennweiten als Ganzes verschoben sind. Mit derart großen Abweichungen ist eine absolute Positionsbestimmung nicht mehr sinnvoll möglich. Es bleibt nur noch die Möglichkeit Positionsänderungen zu vermessen, die eine Messvolumenlänge nicht überschreiten. Der Grund für diese systematischen Abweichungen ist unbekannt. Es werden nichtlineare Materialeigenschaften der Membran angenommen, so dass zum Beispiel die Geschwindigkeit, mit der ein Strom eingestellt wird, die erreichte Brennweite beeinflusst.

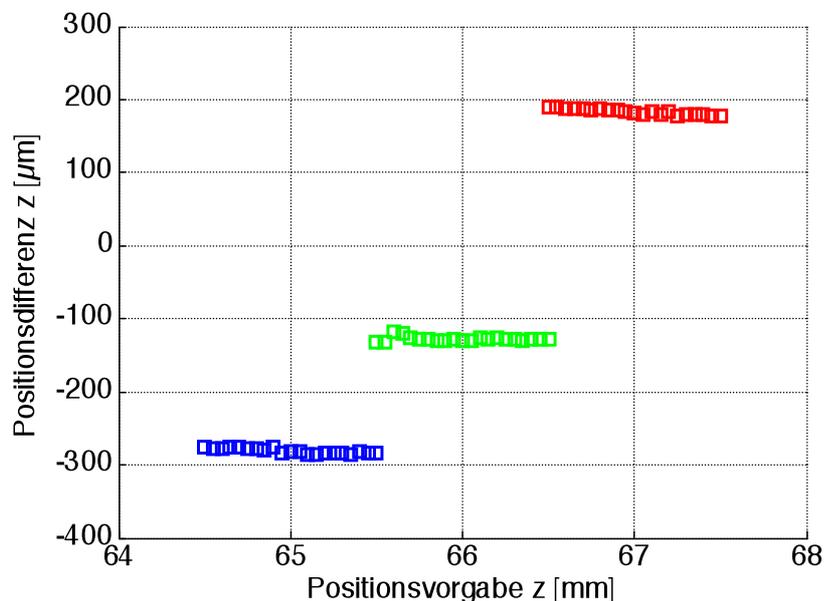


Abb. 8: Es entstehen systematische Messabweichungen zwischen Kalibrierung und Messung an den Übergängen zwischen zwei Brennweiten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Linsenbrennweite und damit der Arbeitsabstand nicht ausschließlich vom eingestellten Linsenstrom abhängig ist. Einschwingdauer, Temperatur, Sprungweite, Sprungrichtung und unbekannte Vorgänge beeinflussen die Brennweite und verschlechtern die Messunsicherheit des Sensors erheblich. Sind die hervorgerufenen Abweichungen systematisch, so lassen sie sich grundsätzlich durch entsprechende Messungen und Kalibrierung korrigieren. Allerdings

steigt der Mess- und Kalibrieraufwand enorm, da alle Einflüsse für den gesamten Brennweitenbereich bestimmt werden müssen. Ein eleganterer und robuster Lösungsansatz ist die direkte Online-Messung der Linsenbrennweite.

Online-Messung der Linsenbrennweite

Einen Ansatz zur Brennweitenbestimmung bietet die Triangulation. Dabei wird mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels ein Teil des Sendelichtes hinter der Frontlinse ausgekoppelt und mit einer Kamera detektiert (Abb. 9). Eine Änderung der Brennweite und damit des Einfallswinkels des Sendestrahls auf den Spiegel führt somit zu einer Verschiebung des Lichtflecks auf der Kamera.

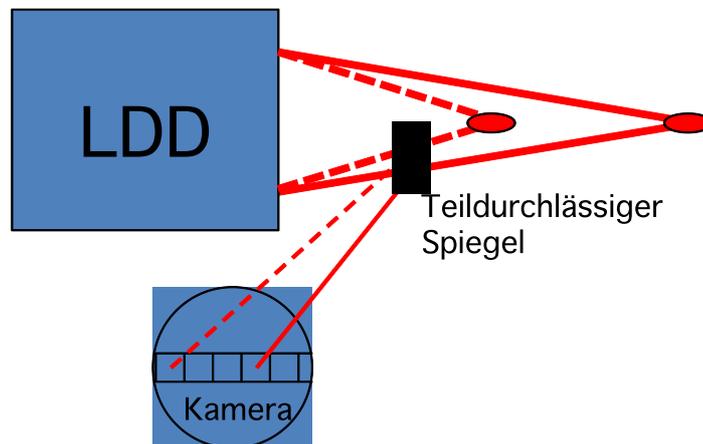


Abb. 9: Prinzip der Brennweitenbestimmung. Abhängig von der eingestellten Brennweite trifft der Teilstrahl unter einem anderen Winkel auf den Spiegel und wird auf einen anderen Ort auf der Kamera reflektiert.

Für die Brennweitenbestimmung wurde eine Matrixkamera mit einer Pixelgröße von $4,4 \times 4,4 \mu\text{m}^2$ und 1600×1200 Pixeln eingesetzt. Die Position des ausgekoppelten Strahls konnte durch Anwendung einer gaußförmigen Fitfunktion mit einer mittleren Standardabweichung von weniger als 0,1 Pixeln genau bestimmt werden. Dies entspricht einer Brennweitenauflösung bei mittlerer Brennweite von ca. $5 \mu\text{m}$. Zur Abschätzung der erreichbaren Messunsicherheiten durch den Einsatz der Online-Brennweitenbestimmung wurden nun die Kalibrierfunktionen $z(q,i)$, mit $i=1:13$ für 13 verschiedene Linsenströme aufgenommen. Dazu wurde der rotierende Schlitz in $100 \mu\text{m}$ Schritten verfahren und für jede Schlitzposition der Quotient der gemessenen Dopplerfrequenzen bestimmt. Die Linsenströme wurden in 4 mA Schritten von 125 mA auf 173 mA erhöht, so dass sich eine Gesamtmessbereichslänge von etwa 13 mm ergibt. Die Messbereichslänge jedes einzelnen Messvolumens beträgt etwa 2 mm . Gleichzeitig zur Kalibrierung wurde die Pixelposition $p(i)$ des ausgekoppelten Strahls auf der Kamera ausgewertet. In Abb. 10 links sind die ermittelten Kalibrierfunktionen $q(z,i)$ für die jeweilig gemessenen Pixelpositionen auf der Kamera dargestellt. Rechts ist der gemessene Zusammenhang zwischen Brennweite und Pixelposition zu erkennen.

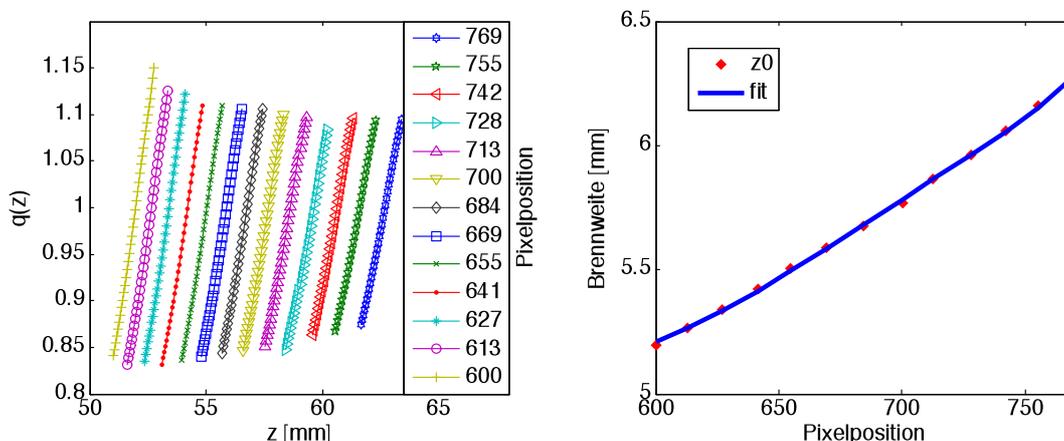


Abb. 10: Links: Kalibrierkurven für 13 verschiedene Linsenströme mit den zugehörigen Pixelpositionen, rechts: Linsenbrennweite in Abhängigkeit der Pixelposition.

In einer Messung kann unter Auswertung der gemessenen Pixelposition nun die Oberflächenposition zunächst grob und mit Hilfe der Kalibrierkurven fein aufgelöst gemessen werden. Dabei ist man unabhängig vom exakten Zusammenhang zwischen Linsenbrennweite und Linsenstrom. Dazu wurde zunächst aus der gemessenen Pixelposition p_m die zugehörige Brennweite f_m bestimmt. Anschließend wurde die Kalibrierfunktion $z(q,i)$ mit dem geringsten Abstand zum gemessenen f_m gewählt. Da sich der Anstieg der Kalibrierfunktionen in Abhängigkeit der Brennweite nur geringfügig ändert, wurde diese Kalibrierkurve zur Positionsbestimmung genutzt. Die Position ergibt sich dann aus der Kalibrierfunktion $z(q,i)$ mit der zugehörigen Brennweite $f(i)$ und dem gemessenen f_m zu $z = z(q,i) \cdot f(i) + f_m$. Zur Bestimmung der auf diese Weise erreichbaren systematischen Abweichung wurden erneut die Signale des am Schlitz gestreuten Lichtes aufgenommen. Die Linsenströme wurden in 4 mA Schritten von 127 auf 171 mA erhöht, so dass andere Brennweiten als bei der Kalibrierung vorlagen. In Abb. 11 ist die systematische Abweichung Δz zwischen der vorgegebenen und der, wie oben beschrieben, gemessenen Schlitzposition dargestellt.

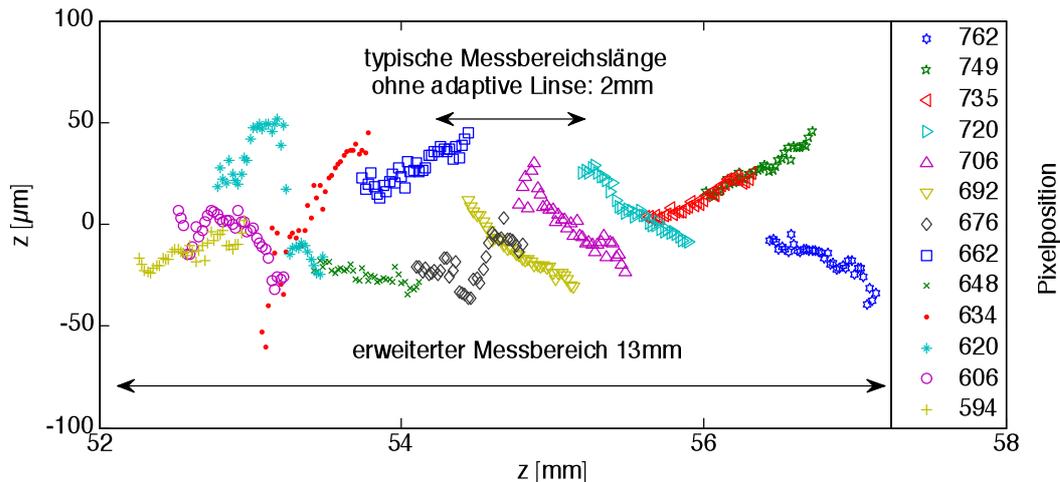


Abb. 11: Systematische Messabweichung für Messungen am rotierenden Schlitz.

Die systematische Messabweichung beträgt dabei maximal $60 \mu\text{m}$. Dies stellt eine Verbesserung gegenüber der Messung ohne Online-Bestimmung der Brennweite um Faktor 5 dar. Weiter ist sichtbar, dass die gemessenen Teilabschnitte sowohl in ihrem Mittelwert als auch in ihrem Anstieg systematisch abweichen können. Eine Abweichung des Mittelwertes lässt dabei auf eine systematische Abweichung bei der Brennweitenmessung schließen. Hier bleibt zu prüfen, in wie weit diese Abweichungen z.B. durch eine geeignetere Abbildung auf die Kamera, die Vermessung des Abstandes zwischen ± 1 . Beugungsordnung, oder unter Einbeziehung des Spotdurchmessers auf der Kamera verbessert werden können. Eine Abweichung im Anstieg, lässt darauf schließen, dass die Anstiege zweier benachbarter Kalibrierfunktionen zu stark voneinander abweichen. Durch eine engmaschigere Kalibrierung und eine Berücksichtigung beider, die Messung umgebender, Kalibrierfunktionen kann dieser Fehler reduziert werden.

Insgesamt konnte der Messbereich mit 13 mm gegenüber herkömmlichen Messbereichslängen von LDD Sensoren um Faktor 6,5 erhöht werden. Die auf den die Messbereichslänge bezogene, systematische Messunsicherheit betrug damit weniger als 0,5 %. Dabei wurde hier zunächst nur ein kleiner Teil des zur Verfügung stehenden Brennweitenbereichs vom 45 bis 125 mm ausgenutzt. Die genannten Maßnahmen zur weiteren Reduzierung systematischer Messabweichungen, sowie das Ausnutzen der vollen 80 mm Brennweitenbereich bieten Potential für weitere Verbesserungen.

Zusammenfassung und Ausblick

Erstmals konnte ein Laser-Doppler-Distanzsensor mit adaptiver Fluidlinse zur synthetischen Erweiterung des Messbereichs realisiert werden. Dabei wurde der Messbereich zunächst von 2 mm auf 13 mm erweitert. Es konnte gezeigt werden, dass die mit der adaptiven Linse erzeugten Interferenzstreifensysteme qualitativ mit denen von Linsen fester Brennweite vergleichbar sind und die Messauflösung nicht maßgeblich beeinflusst. Allerdings zeigte sich auch, dass die verwendete Linse mit Einschwingzeiten von einigen 10 ms bis mehreren 100 ms für viele Anwendungen noch zu langsam und mit Brennweitenabweichungen von mehreren $100 \mu\text{m}$ recht ungenau ist.

Davon ausgehend, dass adaptive Optiken getrieben durch die Unterhaltungselektronik zukünftig vor allem schneller, nicht aber präziser werden, wurde ein möglicher Aufbau zur Online-

Brennweitenbestimmung mittels CCD Kamera vorgestellt. In einem ersten Versuch konnte gezeigt werden, dass sich systematische Messabweichungen so auf maximal 60 μm , bzw. 0,5% des Messbereichs reduzieren lassen.

Zukünftig bleiben Verbesserungsmöglichkeiten der Brennweitenbestimmung zu untersuchen. Auch eine integrierte Regelung der Linsenbrennweite während der Messung ist zu überdenken. Letztlich sollten die Möglichkeit, des Einsatzes adaptiver Linsen auch in anderen optischen Messverfahren geprüft werden.

Quellen

- [1] L. W. Alvarez und W. E. Humphrey, *Variable Power Lens and System*, Patent # 3,507,565 United States Patent Office, 1970
- [2] S. S. Rege, T. S. Tkaczyk und M. R. Descour, *Application of the Alvarez-Humphrey concept to the design of a miniaturized scanning microscope*, OPTICS EXPRESS 2574, Vol. 12, No. 12, 2004
- [3] F. Träger, *Springer handbook of lasers and optics*, Springer Science+Business Media, LCC New York, ISBN 978-0-387-95579-7, 2007
- [4] A. F. Naumov, M. Yu. Loktev, I. R. Guralnik und G. Vdovin, *Liquid-crystal adaptive lenses with modal control*, Optics Letters, Vol. 23, Issue 13, pp. 992-994, 1998
- [5] <http://varioptic.com/products/variable-focus/arctic-316/>, 28.01.2012
- [6] T. Krupenkin, S. Yang und P. Mach, *Tunable liquid microlens*, Appl. Phys. Lett. 82, 316; DOI: 10.1063/1.1536033, 2003
- [7] R. Shamai, D. Andelman, B. Bergec und R. Hayes, *Water, electricity, and between... On electrowetting and its applications*, Soft Matter 4, 38–45, 2008
- [8] X. Zeng und H.i Jiang, *Tunable liquid microlens actuated by infrared light-responsive hydrogel*, Appl. Phys. Lett. 93, 151101; DOI: 10.1063/1.2996271, 2008
- [9] W. Zhang, K. Aljasem, H. Zappe und A. Seifert, *Completely integrated, thermo-pneumatically tunable microlens*, Optical Society of America, 2011
- [10] L. Dong and H. Jiang, *pH-adaptive microlenses using pinned liquid-liquid interfaces actuated by pH-responsive hydrogel*, Appl. Phys. Lett. 89, 211120, DOI: 10.1063/1.2393038, 2006
- [11] H. Yua, G. Zhoua, F. S. Chaua und S. K. Sinhab, *Tunable electromagnetically actuated liquid-filled lens*, Sensors and Actuators A 167, 602–607, 2011
- [12] http://www.optotune.com/index.php?option=com_content&task=view&id=18&Itemid=37, 28.01.2012
- [13] T. Pfister, P. Günther, F. Dreier und J. Czarske, *Messung dynamischer Deformationen und Schwingungen schnell drehender Rotoren*. tm – Technisches Messen 78 (2011) 2 / DOI: 10.1524/teme.2011.01.13, 2011