

## OPTISCHE MESSUNG DER SCHALLGESCHWINDIGKEIT UND DER DICHTEN VON WASSER UND ÖLEN

### OPTICAL MEASUREMENT OF THE SPEED OF SOUND AND THE DENSITY OF WATER AND OILS

J. Schlegel\*, P. Ruan\*, R. Giezendanner-Thoben\*, O. Ohlhafer\* und A. Leder\*\*

\*Robert Bosch GmbH  
Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung  
*Angewandte Forschung 2 – Fluid- und Thermodynamik (CR/ARH1)*  
Postfach 30 02 40  
70442 Stuttgart  
GERMANY

\*\*Universität Rostock  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Lehrstuhl Strömungsmechanik  
Albert-Einstein-Straße 2  
18051 Rostock  
GERMANY

LITA, TGS, LITG, Mach-Zehnder-Interferometer, Schallgeschwindigkeit, Dichte  
LITA, TGS, LITG, Mach-Zehnder-Interferometer, speed of sound, density

#### Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt die experimentelle Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und der Dichte von optisch zugänglichen Flüssigkeiten mit Hilfe laseroptischer Messtechniken. Zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit wird die LITA-Messtechnik („*Laser Induced Thermal Acoustics*“) eingesetzt, die Dichtemessung erfolgt mit Hilfe eines Mach-Zehnder-Interferometers. Beide Verfahren und die für das Verständnis bzw. die praktische Anwendung der Messtechniken wesentlichen physikalischen Grundlagen werden kurz vorgestellt.

Um das Potential der verwendeten Messtechniken zu überprüfen, werden Messungen in Wasser, Hydrauliköl HLP 32 und Prüföl V 1404 unter atmosphärischen Druck und Variation der Temperatur im Bereich von 10 °C bis 60 °C durchgeführt. Die Testmessungen zeigen, dass die der Literatur entnommenen Daten für die Schallgeschwindigkeit und Dichte von Wasser mit Abweichungen von etwa 0,2 % bis 0,5 % reproduziert werden können.

Die Abweichungen der gemessenen Werte für die Schallgeschwindigkeit und Dichte der untersuchten Öle zu den aus der Literatur entnommenen, akustisch ermittelten Vergleichsdaten sind größer und liegen im Bereich von etwa 0,4 % bis zu etwa 1,5 %. Dabei scheinen die geringe Streuung der Messwerte von weniger als 0,3 % und der Quervergleich zwischen den gemessenen Werten für Schallgeschwindigkeit und Dichte auf systematische Unterschiede zwischen den optisch und den akustisch ermittelten Messreihen hinzuweisen.

#### Einleitung

In der Forschung und der Entwicklung ingenieurtechnischer Produkte befindet sich die Industrie heute auf dem Sprung zu einer vorwiegend am Rechner stattfindenden Konzeptions-

und Planungsphase. Motiviert durch den hohen personellen, zeitlichen und finanziellen Aufwand einer auf experimentellen Untersuchungen basierenden Produktentwicklung, wurden und werden große Anstrengungen zur Verbesserung der Vorhersagequalität der heute eingesetzten Simulationstools unternommen. Die Leistungsfähigkeit der numerischen Strömungssimulation wird dabei durch den Ausbau an Rechenkapazitäten, die Weiterentwicklung der Berechnungsmethoden und durch die Entwicklung bzw. die Verbesserung von Stoffmodellen – die der mathematischen Beschreibung der Strömung letztlich ihren physikalischen Inhalt verleihen – gesteigert.

Die den Stoffmodellen zu Grunde liegenden Rohdaten liefert das Experiment, dem sich daher die Aufgabe stellt, die physikalischen Stoffeigenschaften hochpräzise, nicht invasiv und mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu erfassen. Zwei, insbesondere für die Charakterisierung von Hydraulikflüssigkeiten wesentliche Parameter, stellen die Schallgeschwindigkeit und die Dichte dar. Dieser Artikel beschreibt den Einsatz laseroptischer Verfahren zu ihrer experimentellen Bestimmung: die LITA-Technik („*Laser Induced Thermal Acoustics*“) zur Messung der Schallgeschwindigkeit und die Dichtemessung mit Hilfe der Interferometrie.

### **Grundlagen der LITA-Messtechnik**

Die LITA-Technik wird vor allem in gasförmigen Medien zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und der Wärmeleitfähigkeit (CUMMINGS et al., 1995) sowie zur Charakterisierung der viskosen Eigenschaften des Mediums (LI et al., 2002) eingesetzt. In Flüssigkeiten, insbesondere in technisch relevanten Stoffen, existieren bisher nur wenige Messungen zur Schallgeschwindigkeit (ALDERFER et al., 2005) und Wärmeleitfähigkeit (WU et al., 1993). Die Analyse der viskosen Eigenschaften von Flüssigkeiten mit Hilfe von LITA ist Gegenstand aktueller Forschungen (SCHLEGEL et al., 2008).

Die LITA-Messtechnik beruht auf dem Effekt der *opto-akustischen Vierwellenmischung* (CUMMINGS et al, 1995). Das Licht zweier gepulster, zeitlich und räumlich kohärenter Laserstrahlen („*Pumpstrahlen*“) wird in dem zu untersuchenden Medium zur Interferenz gebracht. Die aus der Überlagerung der Lichtwellen resultierende gitterförmige Intensitätsverteilung der Laserenergie induziert ein zeitlich moduliertes Brechungsindexgitter im Medium. An diesem Gitter wird das Licht eines dritten kontinuierlichen Laserstrahls („*Probestrahl*“) gebeugt. Der entstehende vierte Strahl („*Signalstrahl*“) weist die gleiche Wellenlänge wie der Probestrahl auf, während der zeitliche Verlauf der Intensität des Signalstrahls an das induzierte Brechungsindexgitter gekoppelt ist. Der Intensitätsverlauf lässt sich durch die Überlagerung einer gedämpften harmonischen Schwingung und eines langsam abklingenden Gleichanteils beschreiben. Während die Modulationsfrequenz des schwingenden Anteils dabei vor allem von der lokalen Schallgeschwindigkeit des Stoffes abhängt, wird das Abklingen des Signals hauptsächlich durch die Viskosität, die Wärmeleitfähigkeit und die Intensitätsprofile der miteinander interagierenden Laserstrahlen bestimmt.

Liegt die Wellenlänge der Pumpstrahlen in der Nähe einer Absorptionsbande des zu untersuchenden Fluids, wird der Energieeintrag in das Medium durch thermische Prozesse dominiert, d. h. die Pumpstrahlen induzieren eine gitterförmige Temperaturverteilung im zu untersuchenden Medium. Im Widerspruch zu den Bedingungen des thermodynamischen Gleichgewichts wird zum Zeitpunkt der Anregung kein zur Temperaturverteilung korrespondierendes Dichtegitter erzeugt. Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Zeitskalen des Energieeintrags und des Massentransports. Das dadurch erzeugte lokale Ungleichgewicht kann durch die Ausbildung von sich additiv überlagernden gitterförmigen Dichtestrukturen erklärt werden. Dabei handelt es sich um ein ortsfestes *Thermon* und zwei sich mit der lokalen Schallgeschwindigkeit in entgegengesetzten Richtungen ausbreitenden *Phononen* (CUMMINGS et al, 1995). Die geometrischen Abmessungen von Phononen und Thermon folgen der räumlichen Intensitätsverteilung innerhalb des Interferenzgebietes der Pumpstrahlen. Auf Grund der typischen gitterförmigen Verteilung der Laserenergie innerhalb der Inter-

ferenzzone weisen die Strukturen eine sinusförmige Dichtemodulation quer zur Strahlausbreitungsrichtung der Pumpstrahlen auf (SCHLEGEL et al., 2008).

Während sich die Strukturen zu Beginn des Vorganges gegenseitig aufheben, wird die Dichteverteilung im Medium im weiteren Verlauf mit der Brillouin-Frequenz  $f$

$$f = a/k \quad (1)$$

moduliert, wobei  $a$  die lokale Schallgeschwindigkeit und  $k$  den Gitterabstand der räumlichen Intensitätsverteilung der Pumpstrahlen bezeichnet. Setzt man für Schallgeschwindigkeit und Gitterabstand für Flüssigkeiten bzw. Interferenzgitter typische Werte ein, erhält man zu erwartende Signalfrequenzen im Bereich von etwa 75 MHz bis 100 MHz.

Die Bestimmung des Gitterabstandes kann anhand des Kreuzungswinkels der Pumpstrahlen oder durch Kalibrierung der LITA-Technik mit Hilfe eines Fluids mit bekannter Schallgeschwindigkeit erfolgen. In der Literatur werden beide Wege beschrieben (CUMMINGS et al, 1995), wobei die Kalibrierung zu einer deutlich höheren Genauigkeit führt. Dabei hängt der Gitterabstand allein von der Wellenlänge und dem Strahlkreuzungswinkel der Pumpstrahlen ab, sodass die Kalibrierung unabhängig vom jeweiligen Druck, der Temperatur und der Testflüssigkeit gültig ist.

Die Anzahl der beobachteten Oszillationen und die damit verbundene Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Schallgeschwindigkeitsmessung wird von der Wärmeleitfähigkeit, der Scher- bzw. der Volumenviskosität des Fluids und von den geometrischen Abmessungen der Interferenzzone der Pumpstrahlen beeinflusst. Das durch die Absorption der Pumpstrahlen induzierte Thermon stellt eine lokale Störung der Temperaturverteilung des Mediums dar und klingt durch Wärmeleitungsprozesse ab („*thermische Dämpfung*“). Im Gegensatz dazu werden die sich durch das Fluid ausbreitenden Phononen durch den Impulsaustausch mit benachbarten Fluidmolekülen gedämpft („*viskose Dämpfung*“). Der dritte wesentliche Mechanismus des Abklingens laserinduzierter Brechungsindexgitter resultiert aus der Relativverschiebung der Phononen zueinander – die Modulationsdauer des LITA-Signals entspricht gerade der Interaktionszeit der Phononen mit dem Thermon („*geometrische Dämpfung*“).

Während die thermische und die viskose Dämpfung des Signals direkt von den physikalischen Eigenschaften des Stoffes abhängen, kann das geometrische Abklingen durch eine geeignete Strahlformung der Pumpstrahlen in Richtung höherer Zeitskalen verschoben werden (SCHLEGEL et al., 2008). Geht man vereinfachend von einer homogenen Intensitätsverteilung der Pumpstrahlen aus, so ergibt sich die maximal detektierbare Modulationsdauer des LITA-Signals aus dem Quotienten des Pumpstrahlradius und der lokalen Schallgeschwindigkeit. Die Anzahl der für die Frequenzanalyse des Signals zur Verfügung stehenden Oszillationen und damit die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Schallgeschwindigkeitsmessung ist also proportional zum Gitterradius der Pumpstrahlen. Auf Grund der geringen Streueffizienz des opto-akustisch induzierten Brechungsindexgitters führt das Aufweiten der Pumpstrahlen infolge der limitierten Laserleistung im Allgemeinen zu einer deutlichen Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Durch die Verwendung astigmatischer Pumpstrahlen kann dieser Effekt vermindert werden.

## Versuchsaufbau der LITA-Technik

Abb. 1 zeigt den schematischen Versuchsaufbau der LITA-Technik. Der Pumpstrahl wird durch ein Farbstofflasersystem (Spectra Physics Lab 170 / Sirah Cobra Stretch; 440 nm, 20 mJ / Puls, 8 ns Pulsdauer, 10 Hz Pulsfrequenz) erzeugt. Mit Hilfe eines Strahlteilers erfolgt die Aufteilung des Pumpstrahls in zwei s-polarisierte Teilstrahlen gleicher Energie. Bei der Messung mit fokussierten Pumpstrahlen werden beide Strahlen nach dem optischen Wegausgleich über zwei Umlenkspiegel auf eine achromatischen Linse (Fraunhofer Achromat  $f = 470$  mm) gelenkt und unter einem kleinen Winkel (ca.  $1^\circ$  bis  $2^\circ$ ) zum Schnitt gebracht. Für die Messung mit astigmatischen Strahlen werden zusätzlich zylindrische Linsen in den Strah-

lengang integriert, sodass das Brechungsindexgitter nun aus der Überlagerung zweier Lichtschnitte gebildet wird.

Die Messungen werden in einer mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllten optischen Sichtzelle durchgeführt. Die Schichtdicke der Sichtzelle beträgt etwa 10 mm. Mit Hilfe eines Temperiergerätes kann die Temperatur der Zelle bzw. der zu untersuchenden Flüssigkeit im Bereich von ca. 10° bis 60° variiert und durch ein in der Sichtzelle integriertes Widerstandsthermometer (Pt 100) erfasst werden.

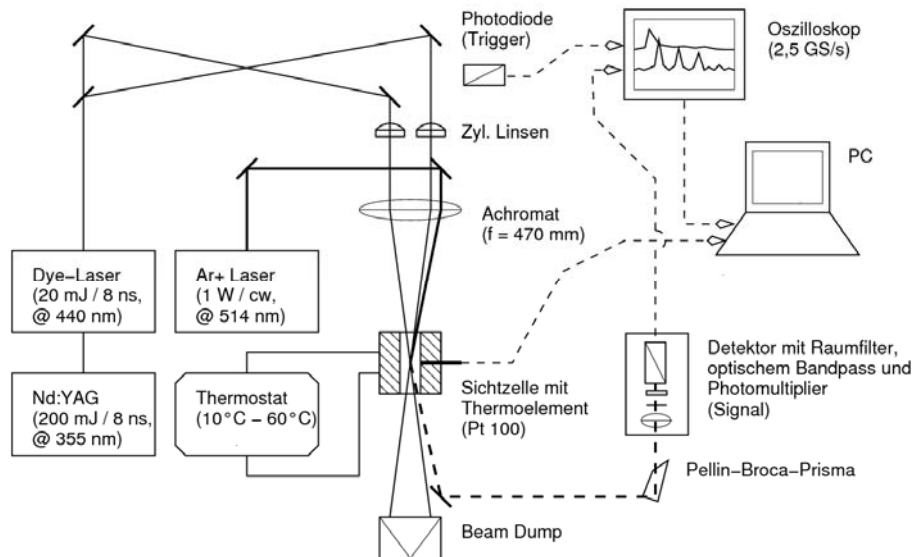


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau der LITA-Messtechnik. Die Kombination aus Zylinderlinsen und Achromat erlaubt eine Aufweitung der Gitterabmessungen auf bis zu 4 mm in Ausbreitungsrichtung der Phononen.

Die Modulation des laserinduzierten Brechungsindexgitters wird durch einen kontinuierlichen Probestrahl ausgelesen. Dafür wird der Strahl eines Argon-Ion-Lasers (Coherent Innova 90, 514 nm, 1 W) mit Hilfe eines Spiegels auf den Achromaten gelenkt. Der Strahl trifft fokussiert und unter Bragg-Bedingungen auf das Brechungsindexgitter, an dem er moduliert und gebeugt wird. Die Pumpstrahlen sind gegenüber dem Probestrahl geneigt, sodass das Messvolumen eine dreidimensionale BOXCAR-Geometrie darstellt. Die Größe des Messvolumens definiert sich aus den Abmessungen der interagierenden Laserstrahlen und variiert daher zwischen 0,2 mm bis 4 mm im Durchmesser und etwa 0,8 mm in der Tiefe.

Zur Trennung des Signals vom Streulicht der Pumpstrahlen wird ein Pellin-Broca-Prisma eingesetzt. Zusätzlich wird der Signalstrahl durch einen Raumfilter und einen optischen Bandpass gefiltert. Die Datenerfassung des optischen Signals erfolgt mit Hilfe eines Photomultipliers (Hamamatsu H-6780 MOD) und eines digitalen Oszilloskops (Tektronix TDS 3034 B, 2,5 GS/s). Zeitgleich wird das dem LITA-Signal zugehörige Temperatursignal mit dem Widerstandsthermometer erfasst. Die Messdaten werden auf einen PC übertragen und analysiert.

Mit dem Aufbau wurde die Schallgeschwindigkeit mit fokussierten und astigmatischen Pumpstrahlen für Wasser, Hydrauliköl HLP 32 und Prüföl V 1404 unter atmosphärischem Druck und bei Variation der Probertemperatur im Bereich von 10 °C bis 60 °C gemessen.

### Die Mach-Zehnder-Interferometrie

Die LITA-Technik nutzt den Effekt der Interferenz zur Erzeugung einer oszillierenden gitterförmigen Störung der Dichteverteilung der zu analysierenden Flüssigkeit. Im Gegensatz dazu wird bei der interferometrischen Dichtemessung untersucht, wie sich Änderungen in der Dichteverteilung der Testflüssigkeit auf ein in geeigneter Weise erzeugtes Interferenzbild auswirken. Zu diesem Zweck wird Licht einer monochromatischen Lichtquelle in zwei Teil-

strahlen gleicher Intensität aufgeteilt. Während einer der Teilstrahlen durch das zu untersuchende Fluid geführt („Objektstrahl“) wird, durchläuft der andere Teilstrahl eine davon unabhängige Referenzstrecke („Referenzstrahl“). Anschließend werden Objekt- und Referenzstrahl unter einem kleinen Winkel zum Schnitt gebracht. Die Intensitätsverteilung der interferierenden Teilstrahlen stellt ein charakteristisches Streifenmuster dar und hängt von einer Vielzahl von Faktoren wie z. B. dem Kreuzungswinkel und der Polarisation der Strahlen oder der Phasenlage der beiden Teilwellen ab.

Vor dem Hintergrund der Interferometrie ist insbesondere der letzte Punkt von besonderem Interesse. Eine temperaturbedingte Änderung der Brechzahl der Testflüssigkeit führt zu einer Änderung der Laufzeit des Objektstrahls bzw. zu einer Phasenverschiebung zwischen Objekt- und Referenzstrahl. Die Phasenverschiebung bewirkt eine Verschiebung des Streifenmusters des Interferenzbildes. Dabei gibt die Anzahl der an einem Punkt des Interferenzbildes beobachteten Streifendurchläufe Aufschluss über den Betrag der Phasenverschiebung.

Unter Verwendung der Clausius-Mosotti-Relation (RUAN, 2008), die die Dichte eines Fluids mit seiner Brechzahl verknüpft, kann die Dichte  $\rho_1$  einer Flüssigkeit aus dem Brechungsindex der Flüssigkeit im Referenzzustand  $n_0$  und der Anzahl der beobachteten Streifendurchläufe  $N_1$  berechnet werden:

$$\rho_1 = \frac{1}{C_{LL}} \cdot \frac{\left(n_0 + N_1 \frac{\lambda}{d}\right)^2 - 1}{\left(n_0 + N_1 \frac{\lambda}{d}\right)^2 + 2} \quad (2)$$

In dieser Gleichung bezeichnen  $C_{LL}$  die experimentell zu bestimmende Lorentz-Lorenz-Konstante,  $\lambda$  die Wellenlänge von Objekt- und Referenzstrahl und  $d$  die Schichtdicke des Fluids.

### Versuchsaufbau der Mach-Zehnder-Interferometrie

Zur Durchführung der Dichtemessung wird das in Abb. 2 skizzierte Mach-Zehnder-Interferometer verwendet. Als Lichtquelle fungiert ein He-Ne-Laser (Uniphase, 633 nm, 20 mW). Mit Hilfe eines nichtpolarisierenden Strahlteilerwürfels wird der Laserstrahl in Objekt- und Referenzstrahl zerlegt. Nachdem der Objektstrahl die zu untersuchende Flüssigkeit passiert hat, werden beide Strahlen überlagert. Das entstehende Interferogramm wird mit Hilfe der Empfangsoptik analysiert.

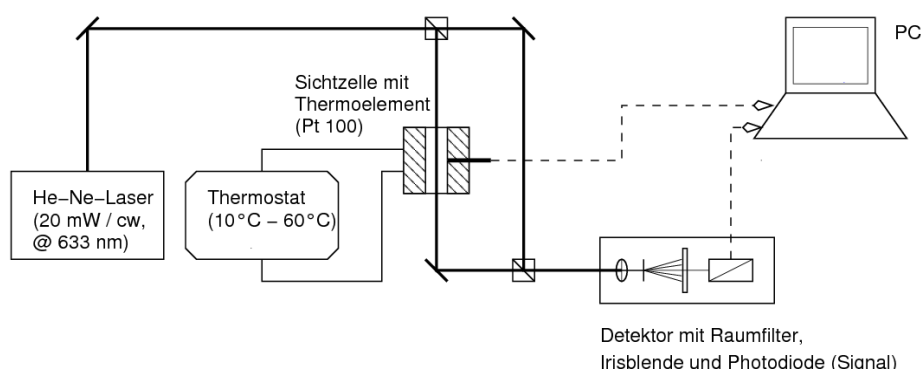


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau des Mach-Zehnder-Interferometers.

Das Testfluid befindet sich in einer mit einem Widerstandsthermometer (Pt 100) versehenen, optischen Sichtzelle. Mit Hilfe eines Temperiergerätes kann die mit einem Kühlmantel versehene Zelle und die Temperatur der in ihr enthaltenen Flüssigkeit im Bereich von 10 °C bis 60 °C variiert werden.

Die Empfangsoptik setzt sich aus einem Raumfilter, einer Irisblende und einer Photodiode zusammen. Der Raumfilter (Mikroobjektiv  $f = 33 \text{ mm}$ , Lochblende  $d = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ) dient zur Aufweitung eines Ausschnittes des Interferogramms. Das so vergrößerte Streifenmuster fällt auf eine Irisblende deren Öffnung kleiner als eine Streifenbreite gewählt wird. Bei einem Streifendurchlauf infolge der Temperaturänderung der Probe erfährt die dahinter angebrachte Photodiode daher eine volle Hell-Dunkel-Modulation. Das Diodensignal wird zusammen mit dem Temperatursignal mit einem PC erfasst und analysiert.

Ausgehend von der Dichte bei Raumtemperatur wurde die Dichteänderung von Wasser, Hydrauliköl HLP 32 und Prüfl V 1404 unter atmosphärischem Druck und bei einer Änderung der Temperatur im Bereich von  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  bestimmt.

### Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Abb. 3 zeigt den zeitlichen Verlauf typischer aus 128 Einzelmessungen gemittelter LITA-Signale in Prüfl V 1404 für eine Probertemperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die linke Abbildung zeigt ein Signal finiter Pumpstrahlen mit einem Strahldurchmesser von etwa  $0,2 \text{ mm}$ ; rechts dargestellt ein Signal astigmatischer Pumpstrahlen mit einer Strahlweite von ca.  $4 \text{ mm}$  in Ausbreitungsrichtung der induzierten Phononen. Die kleinen Darstellungen zeigen das langsame Abklingen des Gleichanteils der jeweiligen Signale.

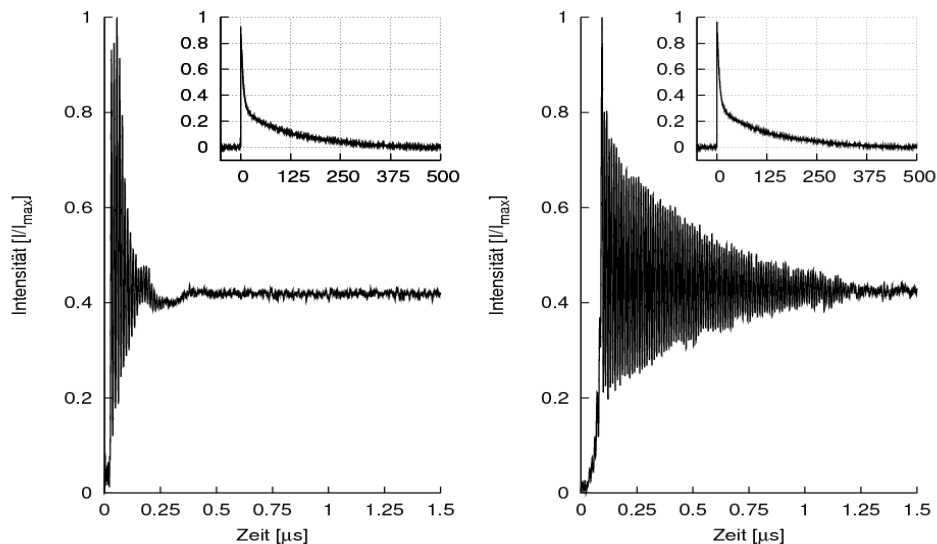


Abb. 3: Typische aus 128 Einzelmessungen gemittelte LITA-Signale von Prüfl V 1404 für finite (links) und astigmatische Gitter (rechts). Während die großen Abbildungen das Abklingen der Modulation in den ersten  $1,5 \text{ }\mu\text{s}$  verdeutlichen, zeigen die kleinen Abbildungen das jeweils dazugehörige Abklingen des Gleichanteils der Signale in den folgenden  $500 \text{ }\mu\text{s}$ .

Die Abbildung macht den Einfluss der Gitterabmessungen auf den Signalverlauf und die Anzahl der Oszillationen des LITA-Signals deutlich. Die in Wasser und Hydrauliköl HLP 32 ermittelten Signalverläufe weisen ein qualitativ ähnliches Verhalten auf. Die Frequenzanalyse der LITA-Signale erfolgt mit Hilfe konventioneller FFT-Algorithmen. Der zur Auswertung verwendete Gitterabstand wurde bei einer Temperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  aus der Signalfrequenz und der aus der Literatur entnommenen Schallgeschwindigkeit von Wasser (LINSTROM et al., 2009) bestimmt. Die auf diese Weise erstellte Schallgeschwindigkeits-Temperatur-Kurve von Wasser zeigt der linke Teil von Abb. 4.

Die Abbildung verdeutlicht die gute Übereinstimmung zwischen den Referenzdaten und den mit der LITA-Technik gemessenen Werten für die Schallgeschwindigkeit. Die mit finiten Gittern ermittelten Datenpunkte weisen eine etwas größere Streuung und Abweichungen von den Literaturdaten von bis zu  $0,5 \text{ %}$  auf. Bei der Verwendung astigmatischer Gitter betragen die Abweichungen zwischen LITA und Referenz ca.  $0,2 \text{ %}$ .

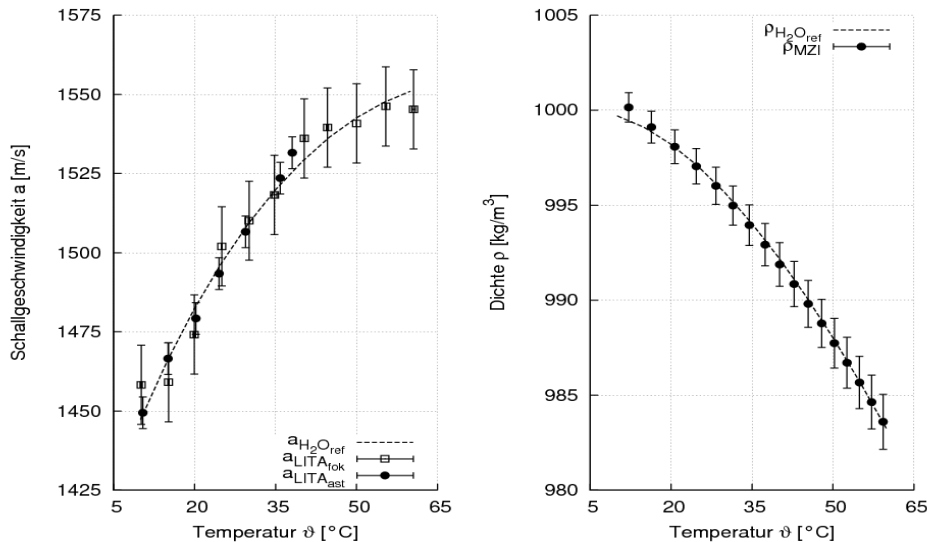


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (links) und der Dichte (rechts) von Wasser. Die Abweichungen von Experiment und Referenzmessung betragen 0,2 % bis 0,5 %.

Im rechten Teil von Abb. 4 ist die mit der Mach-Zehnder-Interferometrie gemessene Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser dargestellt. Die mit Hilfe von Beziehung (2) aus den Messungen ermittelten Daten weichen um etwa 0,2 % von den Literaturwerten ab. Lediglich bei den tiefen Temperaturen zeigt sich eine etwas größere Abweichung.

Bei den in Abb. 5 und 6 dargestellten Messungen in Hydrauliköl HLP 32 und Prüfül V 1404 zeigen sich größere Abweichungen zwischen den experimentell ermittelten Messdaten und den mit Hilfe der Ultraschallmesstechnik ermittelten Vergleichsdaten (LEONHARDT, 2009). Die Schallgeschwindigkeitsmessung unter Verwendung fokussierter Pumpstrahlen führt zu stark streuenden Werten und Abweichungen von bis zu 1,5 % zwischen den LITA-Messungen und der Referenz. Ähnlich wie bei den Messungen in Wasser führt die Anwendung astigmatischer Gitter auch bei der Untersuchung von HLP 32 und V 1404 zu einer deutlich Reduzierung der Streuung der LITA-Messungen.

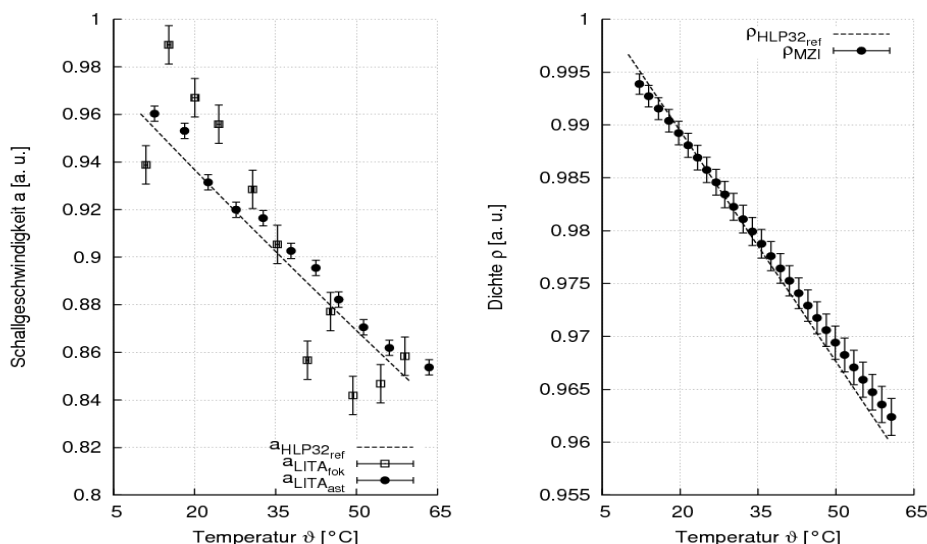


Abb. 5: Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (links) und der Dichte (rechts) von Hydrauliköl HLP 32. Die Abweichungen betragen etwa 0,4 % bis 1,5 %.

Die auf diese Weise ermittelten Daten weichen um bis zu 0,4 % von der Referenz ab – wobei die Unterschiede mit steigenden Temperaturen systematisch zunehmen. Dieses Verhalten wird bei beiden Ölen beobachtet und scheint auf einen systematischen Unterschied zwischen der optischen und der akustischen Messung hinzudeuten. Bei den interferometrisch ermittelten Dichtedaten zeigen sich ähnliche Abweichungen zwischen dem Gradient der op-

tisch ermittelten Messkurve und der aus der akustischen Messung der Schallgeschwindigkeit abgeleiteten Referenzkurve (LEONHARDT, 2009).

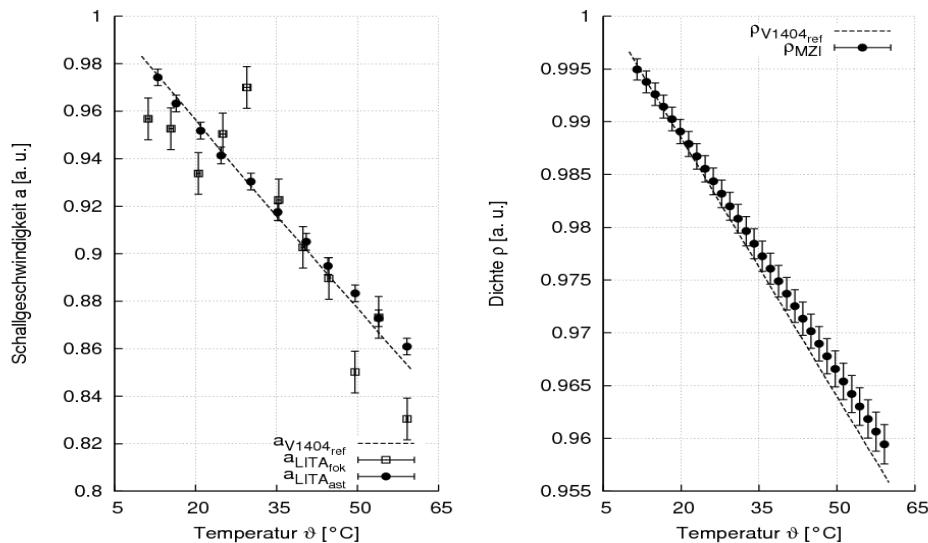


Abb. 6: Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit (links) und der Dichte (rechts) von Prüfl V 1404. Die Abweichungen betragen etwa 0,4 % bis 1,5 %.

Da sowohl die Schallgeschwindigkeits- als auch die Dichtemessung ähnliche systematische Unterschiede zur Referenz aufweisen, scheinen die optisch ermittelten Messdaten einander zu bestätigen, sodass von einer Genauigkeit der Messungen von etwa 0,2 % bis 0,5 % ausgegangen werden kann. Die Frage nach der Ursache der systematischen Unterschiede der optischen und der akustischen Messreihen kann an dieser Stelle nicht beantwortet und muss anhand weiterer Untersuchungen geklärt werden. Die aktuellen Forschungsschwerpunkte bilden daher sowohl die Anwendung der LITA-Technik zur Messung der akustischen und thermischen Dämpfungsraten von Wasser und Ölen, als auch die Durchführung weiterer Schallgeschwindigkeits- und Dichtemessungen.

## Dankesworte

Die Studie entstand im Rahmen einer Dissertation. Für die Unterstützung der Universität Rostock und der Robert Bosch GmbH Stuttgart sei an dieser Stelle gedankt.

## Literatur

- Cummings E. B., Leyva I. A. und Hornung H. G., 1995: Laser-induced thermal acoustics (LITA) signals from finite beams. *APPLIED OPTICS*, **34(18)**: 3290-3302
- Li Y., Roberts W. L. und Brown M. S., 2002: Investigation of Gaseous Acoustic Damping Rates by TGS. *AIAA*, **40**: 1071-1077
- Alderfer D. W., Herring G. C., Danehy P. M., Mizukaki T. und Takayama K., 2005: Submicrosecond temperature measurement in liquid water with laser-induced thermal acoustics. *APPLIED OPTICS* **44(14)**: 2818-2826
- Wu G., Fiebig M. und Wang J., 1993: Determination of the Thermal Diffusivity of Liquids by LITG. *Fluid Phase Equilibria*, **88**: 239-249
- Schlegel J., Giezendanner-Thoben R. und Leder A., 2008: Optische Messung der Schallgeschwindigkeit und der Viskosität von Flüssigkeiten. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 16. Fachtagung der GALA e.V.*, S. 2.1 – 2.8
- Ruan P., 2008: Interferometric Measurement of the Density of Fuels and Oils under Ultra-High-Pressure. *Master Thesis, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft*
- Linstrom P.J. und Mallard W. G., 2009: **NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69**, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, <http://webbook.nist.gov>, (retrieved June 8, 2009).
- Leonhardt R., 2009: *Persönliche Mitteilung – R. Leonhardt, Robert Bosch GmbH Stuttgart*