

Vergleich zwischen Laser-Doppler- und photorefraktivem Interferometer zur Messung von akustischen Oberflächenwellen unter industriellen Bedingungen

Felix Brand¹, Ferdinand Singer¹, Marco Gerbeth¹, Maria Kufner¹

¹Institut für Sensor- und Aktortechnik, Am Hofbräuhaus 1b, 96450 Coburg, Deutschland

Zusammenfassung

Laserbasierte-Ultraschall Verfahren werden unter Laborbedingungen bereits häufig verwendet, um Werkstoffeigenschaften zu ermitteln. Falls die zu vermessenden Proben jedoch eine diffuse Reflexion des Messlaserstrahls verursachen, treten häufig Probleme bei der Anwendbarkeit der laserbasierten Detektion auf. Ein zusätzliches Problem für die Anwendbarkeit von laserbasierten Ultraschall-Verfahren im industriellen Umfeld stellen niederfrequente Umgebungsschwingungen dar. Ein Interferometer mit photorefraktivem Kristall verspricht selbst bei einer Reflexion mit Speckle-Muster und Störschwingungen noch gute Signal-zu-Rausch-Verhältnisse. Ein Laser-Doppler-Vibrometer besitzt dagegen unter Laborbedingungen theoretisch eine niedrigere Detektionsgrenze, sofern eine gut reflektierende Probe sowie ausreichende Isolation von Störschwingungen vorhanden sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein selbst entwickeltes Interferometer mit photorefraktivem Kristall mit einem Laser-Doppler-Vibrometer verglichen. Als Probe dient eine geschliffene Stahlprobe, die für die optische Messung nicht speziell behandelt wurde.

Keywords: Laserakustik, akustische Oberflächenwellen, photorefraktives Interferometer, Laser-Doppler-Vibrometer

Einleitung

Als Laser-Ultraschall Verfahren (engl. Laser-Based Ultrasound, kurz LBU) bezeichnet man Methoden, bei denen Ultraschallwellen mit einem Laser angeregt und mit einem laserbasierten Messsystem, zum Beispiel einem Michelson-Interferometer, detektiert werden. Bereits frühe Untersuchungen haben gezeigt, dass homodyne, stabilisierte Michelson-Interferometer (kurz MI) dazu geeignet sind, breitbandig laserangeregte Ultraschallwellen mit einem hohen Signal-zu-Rausch Verhältnis zu detektieren [1] [2]. Cielo [1] verwendete ein stabilisiertes, homodynes MI, um Ultraschallwellen zu detektieren, die entlang eines geschlossenen Kreises auf einem polierten Substrat angeregt wurden. Darauf aufbauend entwickelten Neubrand et al. [2] ein stabilisiertes homodynes MI zur Detektion von Rayleighwellen, die durch den Linienfokus eines gepulsten Lasers angeregt wurden. In den Folgejahren wurden Messsysteme für spezifische Anforderungen entwickelt. Neubrand und Hess [3] stellten ein LBU System zur Bestimmung der Eigenschaften unterschiedlicher Beschichtungen auf Quarzglas und Silizium vor. Die Beschichtungen

hatten dabei Schichtdicken im Bereich von 35 nm (Silber auf Quarzglas) bis 3 μ m (Aluminium auf Quarzglas). Glorieux et al. [4] entwickelten eine Methode, um mit einem LBU System tiefenaufgelöst Eigenspannungen von kugelgestrahlten Werkstücken zu untersuchen. Weiterführende Untersuchungen wurden allerdings durch die Anforderung an eine gut reflektierende Oberfläche erschwert. Auch für Untersuchungen der Mikrostruktur von Gusseisen mithilfe eines LBU Systems mussten die Proben zunächst poliert werden [5]. In eigenen Untersuchungen wurden Anisotropie-Parameter von gewalzten Aluminiumplatten [6], Schichteigenschaften- und Dicken von Polymerbeschichtungen [7] sowie von porösem Aluminiumoxid auf Aluminium [8] bestimmt. Hierfür wurde ein kommerziell erhältliches, heterodynes Mach-Zehnder verwendet (Polytec UHF-120).

Proben, die in einem industriellen Umfeld zu untersuchen sind, besitzen häufig keine glatte, gut reflektierende Oberfläche. Der von einer solchen Probe zurückgestreute Laserstrahl besitzt im Gegensatz zum Referenzstrahl keine ebene Wellenfront mehr und weist ein Specklemuster auf. Eine vollständige Interfer-

enz ist dadurch nicht mehr möglich. In einem MI oder Mach-Zehnder Interferometer (kurz MZI) ist daher nur ein einzelnes Speckle fähig, mit dem Referenzstrahl zu interferieren. Hierfür wird der Detektionslaserstrahl auf einen möglichst kleinen, annähernd homogen reflektierenden Bereich fokussiert [9]. Dieses Verfahren ist jedoch sehr zeitaufwändig und kann verhindern, dass die Detektion an einem vorher festgelegten, genau definierten Punkt durchgeführt werden kann. Verlässt der Laserstrahl den zuvor eingestellten mikroskopisch kleinen Bereich guter Reflexion auch nur zum Teil, sinkt die Interferenz-Amplitude und somit das Signal-zu-Rauschverhältnis bereits beträchtlich. Dies kann zum Beispiel durch ungewollte Schwingungen oder Drift der zum Einstellen verwendeten Linearachsen verursacht werden. Alternativ kann mit Galvano-Scanning Spiegeln der Laserstrahl des Interferometers automatisiert zu gut reflektierenden Stellen gelenkt werden. Diese Methode benötigt jedoch eine automatisierte Ansteuerung der Spiegel sowie einen geeigneten Algorithmus, um in möglichst kurzer Zeit eine möglichst gute Reflexion zu erzielen [10]. Bei der Verstellung des Laserstrahls müsste zusätzlich der Anregestrahl mit verstellt werden. Häufig ist auch der Bereich, in dem eine ausreichende Reflexion gesucht werden kann, durch die Bauteilgeometrie oder der zu untersuchenden Region stark eingeschränkt. Die genannten Nachteile machen diese Methode aufwändig und unhandlich.

Eine weitere Methode zur Speckle-Kompensation beruht auf Signaldiversität [11]. Hierbei werden unterschiedliche Speckle mit jeweils eigenen Sammellinsen aufgefangen und zu jeweils eigenständigen Interferenzen mit einem Referenzstrahl an getrennten Photodetektoren gebracht. Durch den zusätzlichen Signalpfad wird ein größerer Teil des zurück gestreuten Laserlichts für die Auswertung verwendet, wodurch die Stabilität und Genauigkeit der Messung steigt. Durch die zusätzlichen optischen Komponenten und Schritte in der Signalauswertung steigen jedoch Aufwand und Kosten für ein solches Interferometer. Darüber hinaus ist die Signalverbesserung durch Diversität stark von den Specklemustern und der Anordnung der Sammellinsen abhängig.

Aufgrund dieser Nachteile der MI und MZI wurden viele Arbeiten durchgeführt, die die Speckle-Insensitive optische Ultraschall-detektion zum Ziel hatten [12] [13]. Die in [12] und [13] entwickelten Messsysteme sind jedoch unhandlich und sehr komplex im Aufbau.

Das in dieser Arbeit verwendete Interferometer basiert auf Zweistrahlmischung in einem photorefraktiven Kristall. (engl. photorefractive

crystal, kurz PRC). Diese Methode ist Speckle-Insensitiv und der verwendete GaAs Kristall erfüllt zugleich die Funktion eines Hochpasses gegen niederfrequente Störschwingungen [14]. Der photorefraktive Kristall dient als adaptiver Strahlteiler, der einen Teil des Pumpstrahls in die gleiche Richtung wie den Signalstrahl ablenkt. Die aufwändige Justierung der Teilstrahlen auf Interferenz entfällt somit.

Aufbau des Interferometers mit photorefraktivem Kristall

Das verwendete photorefraktive Interferometer ist ein selbst entwickelter Aufbau, der nicht kommerziell erhältlich ist.

Als Detektionslaser wird ein diodengepumpter Nd:YAG-Laser mit 500 mW Leistung verwendet. Dieser wird in einen Pump- und in einen Signalstrahl aufgeteilt, die am photorefraktiven Kristall (undotierter GaAs-Kristall) miteinander interferieren. Nach Durchlaufen des Kristalls wird der Laserstrahl aufgeteilt und auf zwei Photodioden fokussiert. Die Photodetektoren sind mittels eines abgeglichenen Differenzverstärkers verschaltet, was eine hohe Gleichtaktstörunterdrückung sowie eine Verstärkung des Differenzausgangs bewirkt.

Photorefraktiver Kristall

Der photorefraktive Kristall stellt das Kernelement des oben erläuterten Interferometers dar. Innerhalb dieses Kristalls interferieren Pump- und Signalstrahl miteinander und erzeugen aufgrund des photorefraktiven Effekts eine Brechzahlmodulation, die wie ein Gitter wirkt. An diesem Gitter wird ein Teil des Pumpstrahl gebeugt. Dieser hat nach dem Kristall dieselbe Ausbreitungsrichtung und Phasenfrontkrümmung wie der Signalstrahl [9]. Dies ermöglicht die Interferenz beider Teilstrahlen an den Detektoren.

Als photorefraktiver Kristall wird ein 5x5x10 mm großer undotierter GaAs-Kristall verwendet, dessen Ein- und Austrittsfläche antireflexionsbeschichtet ist. GaAs bietet dabei den Vorteil, dass dieser Kristall mit 14 μ s eine relativ niedrige Zeitkonstante für das Ausbilden des Gitters besitzt. Langsame Änderungen werden dynamisch im Kristall angepasst und sorgen für eine Kompensation von niederfrequenten Umgebungsvibrationen [9].

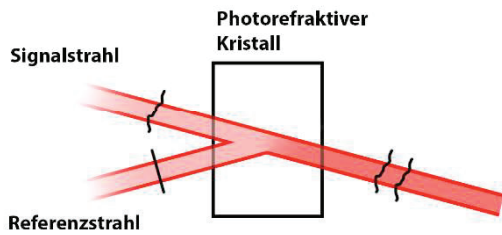


Abb. 1: Der photorefraktive Kristall führt Signal- und Referenzstrahl zusammen und passt die Phasenfronten beider Strahlen an.

Aufbau des Laser-Doppler-Vibrometers

Als vergleichendes Messinstrument zum PRC-Interferometer wird ein Laser-Doppler-Vibrometer (kurz LDV) verwendet. Es handelt sich um ein heterodynes Mach-Zehnder Interferometer mit einer Bragg-Zelle mit einer Modulationsfrequenz von ca. 630 MHz. Als Detektionslaser dient ein 5 mW DPSS Nd:YAG Laser bei 532 nm. Zur Demodulation wird das Arctan-Demodulationsschema (siehe [15]) herangezogen. Für das LDV wird eine Sammellinse mit einer Brennweite von 100 mm und einem Durchmesser von 25,4 mm verwendet. Mikroskopie-Objektive wären zwar vorteilhaft für die Messung, können jedoch nicht verwendet werden, da sie den Strahl des Anregelasers behindern würden.

Das Interferometer besitzt für eine perfekt spiegelnde Oberfläche eine sehr niedrige Detektionsgrenze von bis zu $30 \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$. Diese hängt jedoch stark vom Reflexionsgrad und der Speckle-Intensität ab. Vor allem bei inhomogenen Proben kann die Detektionsgrenze stark abnehmen.

Laserbasierte Erzeugung von akustischen Oberflächenwellen

Die hier verwendete laserbasierte Ultraschallerzeugung wurde bereits in [7] beschrieben. Hier soll deshalb nur ein Überblick über die wichtigsten Kenndaten gegeben werden.

Um eine ebene Wellenfront der Schallwellen zu erzeugen, wird der Laserpuls über einer Zylinderlinse auf eine Linie fokussiert. Die Erzeugung der Oberflächenwellen erfolgt dabei im thermoelastischen Regime.

Es wurden zwei verschiedene Messsysteme realisiert. Im ersten Messsystem, in dem das photorefraktive Interferometer verwendet wurde, wurden Rayleighwellen mit einem gepulsten Stickstofflaser angeregt. Dieser hat eine FWHM Pulsbreite von 3 ns, eine Pulsenergie von $100 \mu\text{J}$ und eine Wellenlänge von 337 nm. Der Laserstrahl wurde mit einer Zylinderlinse auf eine dünne Linie mit einer

Länge von 5 mm fokussiert. Damit ergibt sich eine Energiedichte pro Puls von $20 \text{ mJ}/\text{cm}^2$.

Im zweiten Messsystem wurde das LDV verwendet. Hier wurde ein gepulster Nd:YAG Laser zur Anregung von Rayleighwellen verwendet. Dieser besitzt eine Pulsenergie von 11 mJ, FWHM Pulsdauer von 4 ns und Wellenlänge von 532 nm. Der Nd:YAG Laser wurde auf eine Linie von 15 mm Breite fokussiert. Dies resultiert in einer Energiedichte pro Puls von $270 \text{ mJ}/\text{cm}^2$.

Messdatenfilterung

Bei allen hier dargestellten Messsignalen wurde ein Zero Phase IIR-Butterworth Filter zweiter Ordnung mit den Grenzfrequenzen 0.5 MHz und 25 MHz angewendet.

Verwendete Probe

Als Probe wurde eine 1 cm dicke geschliffene Strahlprobe verwendet, die eine Härte von 58 HRC aufweist. Die Probenoberfläche wurde für die Messung nicht speziell behandelt.

Messung einer laserangeregten Oberflächenwelle

In Abb. 2 und Abb. 3 ist eine Messung mit dem PRC-Interferometer bzw. dem LDV zu sehen. Der Abstand zwischen Anregung und Detektion entspricht etwa 4 mm.

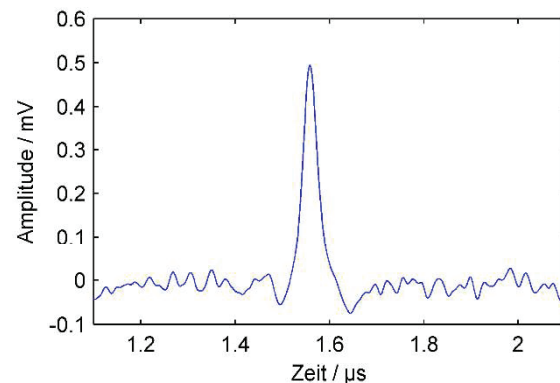


Abb. 2: Messung einer laserangeregten Oberflächenwelle mit dem PRC-Interferometer. Es wurde über 1000 Laserpulse gemittelt

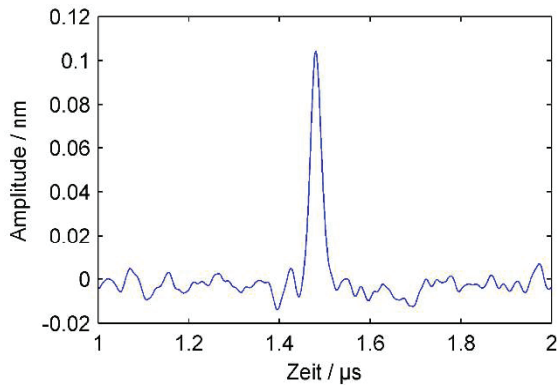


Abb. 3: Messung einer laserangeregten Oberflächenwelle mit dem LDV. Es wurde über 1000 Laserpulse gemittelt.

Beide Messungen wurden auf derselben Probe mit etwa dem gleichen Abstand zwischen Anregung und Detektion durchgeführt. Die Abweichungen der Signalförmigkeit beider Messungen lassen sich primär durch die unterschiedlichen Anregelaser erklären. So ist z.B. die größere Pulsbreite bei der PRC-Messung auf die größere Fokusbreite des Stickstofflasers zurückzuführen. Diese bewirkt eine niedrigere Bandbreite sowie Amplitude, was zu einem zeitlich breiteren Oberflächenimpuls führt [5].

Somit konnte gezeigt werden, dass beide Messsysteme geeignet sind, um laserangeregte Oberflächenwellen zu messen.

Versuche zum Rauschverhältnis

Im Folgenden wurde das Rauschverhältnis (kurz RV) beider Interferometer bei unterschiedlicher Anzahl an Mittelungen bestimmt. Zur Berechnung des Rauschverhältnisses RV wurde die Peakhöhe P der Oberflächenwelle zu der Standardabweichung des Grundrauschens N berechnet. Um den Effekt der unterschiedlichen Anregelaser zu kompensieren, wurden die Peakhöhen jeweils auf die Energiedichte ρ des Laserfokus normiert.

$$RV/dB = 20 dB \cdot \log_{10} \frac{P/\rho}{N}$$

Die Messergebnisse sind in Abb. 4 graphisch dargestellt.

Es ist hierbei nochmals darauf hinzuweisen, dass der unterschiedliche Absorptionsgrad bei den unterschiedlichen Wellenlängen des Anregelaser vernachlässigt worden sind.

Abb. 4 kann man entnehmen, dass das RV bei dem Interferometer mit photorefraktivem Kristall bei allen Mittelungszahlen einen erheblich höheren Wert annimmt.

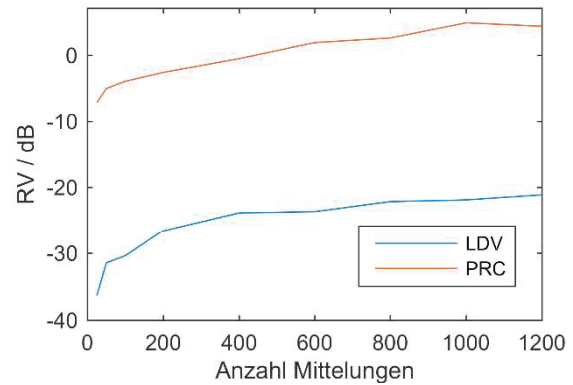


Abb. 4: normiertes RV über unterschiedlicher Anzahl an Mittelungen des PRC-Interferometers bzw. des LDV

Versuche zur Speckle-Sensitivität

Um zu untersuchen, ob das verwendete PRC-Interferometer, wie es nach der Theorie zu erwarten ist, unabhängig von der Probenoberfläche bzw. Speckle-Reflexion funktioniert, wurden mehrere Messungen an unterschiedlichen Positionen der selben Probe, jedoch mit gleichbleibendem Abstand zwischen Anregung und Detektion durchgeführt. Um die unterschiedlich starke Reflexion an den einzelnen Messpunkten auszugleichen, wurde das Aufteilungsverhältnis zwischen Signal- und Pumpstrahl angepasst, sodass die Intensität an den Photodioden bei jeder Messung in etwa gleich groß ist.

Ein Ausschnitt der Messsignale ist Abb. 5 zu entnehmen. Hierbei ist sehr deutlich zu erkennen, dass der Signalpeak bei allen Messungen eine ähnliche Form und Amplitude annimmt. Das Signalrauschen links- und rechtsseitig vom Oberflächenwellenimpuls besitzt einen ähnlichen Wert.

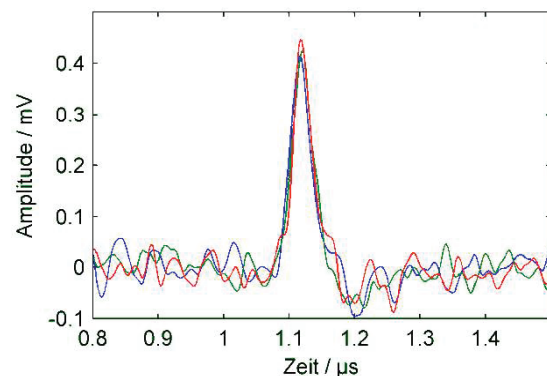


Abb. 5: Dreimalige Messung einer homogenen Probe mit dem PRC-Interferometer an unterschiedlichen Positionen. Es wurde über 200 Laserpulse gemittelt.

Eine ähnliche Messung wurde zu Vergleichszwecken mit dem LDV durchgeführt. In Abb. 6 sind drei Messungen an unterschiedlichen Positionen auf der Probe abgebildet. Da hierbei die Intensität des Signalstrahls nicht angepasst werden kann, wurde in der Legende die Stärke der Rückstreuung abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass der Oberflächenwellenpuls bei allen drei Messungen erfasst worden ist, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis vor allem bei den weniger stark reflektierenden Stellen im Vergleich zu der Messung mit dem PRC-Interferometer jedoch deutlich schlechter ist. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass die abgebildeten Messsignale nicht auf die Energiedichte des Anregelasers normiert sind.

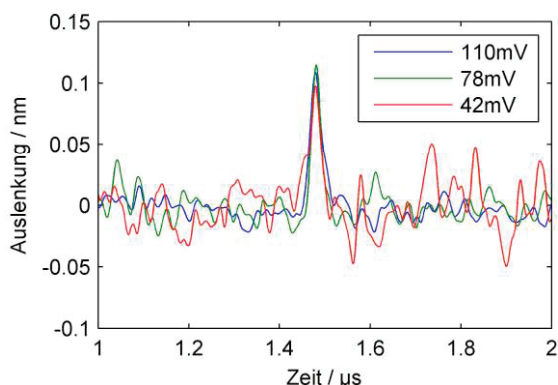


Abb. 6: Dreimalige Messung einer homogenen Probe mit dem LDV an unterschiedlichen Positionen. Es wurde über 200 Laserpulse gemittelt. In der Legende ist die Stärke der Rückstreuung zum LDV zu sehen.

Fazit

Es konnte bestätigt werden, dass eine Detektion von akustischen Oberflächenwellen mit dem Interferometer mit photorefraktivem Kristall möglich ist. Der wohl größte Nachteil dieses Interferometers liegt darin, dass eine Angabe der absoluten Amplitude der Oberflächenwelle in Nanometer ohne Kalibration nicht möglich ist, was jedoch für viele Anwendungen nicht relevant ist. Zudem benötigt das PRC-Interferometer einen deutlich stärkeren Detektionslaser, wobei ein Großteil davon zum Pumpen des photorefraktiven Kristalls benötigt wird.

Bezüglich des Rauschverhältnisses ist das PRC-Interferometer dem LDV auf industriell rauen Oberflächen deutlich überlegen.

Es konnte zudem gezeigt werden, dass das PRC-Interferometer bei unterschiedlich starken Reflexionsgraden und Speckle-Reflexionen ein Signal mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis liefert. Dies ermöglicht im Vergleich zum LDV eine einfache Justierung der Probe.

Eine weitere Unterscheidung liegt in der Messdatenverarbeitung. Das LDV erfordert aufgrund der Modulation des Detektionslasers eine aufwändige Demodulation des Signals, was sich in einer industriellen Anwendung als zeitlich kritischer Faktor herausstellen kann. Dies ist vor allem bei Anwendungen, die eine hohe Mittelungszahl benötigen, der Fall. Diese Demodulation entfällt bei dem PRC-Interferometer.

Ausblick

Zukünftig wird die Kompensation von Störschwingungen durch den GaAs Kristall weiter untersucht. Des Weiteren werden Messungen der Dispersionseigenschaften oberflächenbehandelter Werkstücke mit dem photorefraktiven Interferometer durchgeführt.

Danksagung

Das Vorhaben wurde vom europäischen Fonds für regionale Entwicklung, Projekt Sensolutions, unterstützt und entstand im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit innerhalb der Technologie Allianz Oberfranken. Die Autoren danken den Mitarbeitern des Instituts für Sensor- und Aktortechnik für die hilfreiche Unterstützung bei der Durchführung der Arbeiten.

Literaturnachweis

- [1] P. Cielo, F. Nadeau und M. Lamontagne, *Ultrasonics*, Bd. 23, Nr. 2, 55-62 (1985); doi: 10.1016/0041-624X(85)90033-2
- [2] A. Neubrand, L. Konstantinov und P. Hess, in *Physical Acoustics*, Boston, MA, Springer US, 551-556 (1991); doi: 10.1007/978-1-4615-9573-1_73
- [3] A. Neubrand und P. Hess, *Journal of Applied Physics*, Bd. 71, Nr. 1, 227, (1992); doi: 10.1063/1.350747
- [4] C. Glorieux, W. Gao, S. E. Kruger, K. van de Rostyne, W. Lauriks und J. Thoen, *Journal of Applied Physics*, Bd. 88, Nr. 7, 4394-4400 (2000); doi: 10.1063/1.1290457
- [5] W. Gao, C. Glorieux, S. E. Kruger, K. van de Rostyne, V. Gusev, W. Lauriks und J. Thoen, *Materials Science and Engineering: A*, Bd. 313, Nr. 1-2, 170-179 (2001); doi: 10.1016/S0921-5093(01)01143-1
- [6] F. Singer, *Proc. Sensoren und Messsysteme 2014*, 1-6, (2014); ISBN: 978-3-8007-3622-5
- [7] F. Singer, *AMA Conferences 2015*, 119-123 (2015); doi: 10.5162/sensor2015/A5.3
- [8] F. Singer, *Physics Procedia*, Bd. 70, 334-337 (2015); doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.219
- [9] R. J. Dewhurst und Q. Shan, *Measurement Science and Technology*, Bd. 10, Nr. 11, 139-168 (1999); doi: 10.1088/0957-0233/10/11/201

- [10] S. Serafini, N. Paone und P. Castellini, *The Review of scientific instruments*, Bd. 84, Nr. 12, 121703 (2013); doi: 10.1063/1.4845475
- [11] C. Rembe und A. Dräbenstedt, *Proceedings SENSOR 2015*, 505-510, (2015); doi: 10.5162/sensor2015/D1.1
- [12] M. Clark, *Journal of Physics: Conference Series*, Bd. 278, 012025 (2011); doi: 10.1088/1742-6596/278/1/012025
- [13] Q. Shan, C. M. Chen und R. J. Dewhurst, *Measurement Science and Technology*, Bd. 6, Nr. 7, 921-928 (1995); doi: 10.1088/0957-0233/6/7/010
- [14] A. Blouin und J.-P. Monchalin, *Applied Physics Letters*, Bd. 65, Nr. 8, 932 (1994); doi: 10.1063/1.112153
- [15] C. Rembe, S. Boedecker, A. Dräbenstedt, F. Pudewills und G. Siegmund, *SPIE*, 70980A-70980A-12 (2008); doi: 10.1117/12.802930