

**Abschlussbericht Polytec:**

**Laser-Doppler-Vibrometer  
mit Computer Generierten Hologrammen  
zur Konfigurierung von Messpositionen**

**(13N9338)**

des

**Projektantrags:**

**Computergenerierte Hologramme für neuartige  
Messverfahren in der Laser-Doppler-Vibrometrie**

**HoloVib**

**Projektzeitraum 01.01.2009 - 31.12.2012**

Ansprechpartner des Teilvorhabens:

Dr. Christian Rembe  
Polytec GmbH  
Polytec Platz 1-7  
76337 Waldbronn  
Tel: 072 43 604 1890  
Fax: 072 43 699 44  
c.rembe@polytec.de

# I. Kurzdarstellung

## I.1. Aufgabenstellung

Das Teilvorhaben „Laser-Doppler-Vibrometer mit Computer Generierten Hologrammen zur Konfigurierung von Messpositionen“ von Polytec im Verbundvorhaben „Computergenerierte Hologramme für neuartige Messverfahren in der Laser-Doppler-Vibrometrie (HoloVib 13N9338)“ hatte zum Ziel die Möglichkeiten von computergenerierten Hologrammen zu evaluieren, um optische Vibrationsschwingungsmesssysteme nach dem Laser-Doppler-Prinzip zu verbessern. Dabei sollten folgende Einsatzmöglichkeiten erforscht werden: (1) Aufteilen von Laserstrahlen in parallele Einzelstrahlen mit genauer geometrischer Anordnung, um bei einer hohen Anzahl von Interferometern die Justage zu vereinfachen (statisches holographisches Element), (2) Optimierung der Signalqualität durch Erzeugung von Wellenfrontveränderungen, die das zurückgestreute Laser-Speckle-Feld optimieren, (dynamisches Holographisches Element) und (3) zum Erzeugen und Positionieren des Messpunktgitters (dynamisches Holographisches Element). Für die Erzeugung von statischen holographischen Elementen sollte auf die beim Partner ITO (Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart) vorhandenen Fertigungseinrichtungen zurückgegriffen werden. Dynamische Hologramme können mit geeigneten dynamischen Phasenhologrammen oder Amplitudenhologrammen erzeugt werden. Die Erzeugung von Amplitudenhologrammen führt zu hohen Lichtverlusten und daher wurden nur Phasenhologramme erforscht, wobei sogenannte Räumlichen Lichtmodulatoren (Spatial Light Modulator SLM) vorgesehen waren. Dazu sollten geeignete Komponenten gesucht und evaluiert werden. Die Einsatzmöglichkeiten der vorhandenen Technologie sollte aufgezeigt werden und die Anforderung an zukünftige technische Lösungen für SLM sollte abgeleitet werden.

Die zu erarbeitende Messtechnik für ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) sollte mit zwei Funktionsmustern demonstriert werden. Es war vorgesehen, mit Funktionsmuster 1 ein Raster-LDV mit dynamischem Hologramm zur Strahlpositionierung und Fokussierung zu demonstrieren. Mit diesem Funktionsmuster sollte auch die dynamische Optimierung der Signalqualität evaluiert werden. Mit dem Funktionsmuster 2 sollte ein Mehrkanalvibrometer demonstriert werden. In diesem Gerät sollten zum einen statische Hologramme zur genauen Strahlauflösung und dynamische Hologramme zur Messstrahlpositionierung und Fokussierung erforscht werden.

In dem Projektkonsortium von HoloVib befanden sich zwei Anwendungspartner aus der Automobilindustrie (Bosch und Continental), welche die Funktionsmuster evaluieren sollten und Verbesserungsnotwendigkeiten sowie Verbesserungspotential aufzeigen sollten. So sollte sichergestellt werden, dass einsatzfähige Technologie mit den Funktionsmustern erarbeitet wird. Des Weiteren haben 2 Universitätsinstitute an dem Forschungsprojekt mitgearbeitet. Das ITO hat sich mit Optikdesign der Systeme und Fachwissen zur Holographie und Computergenerierten Hologrammen eingebracht. Der Lehrstuhl für Automatisierungstechnik/Regelungstechnik hat über einen Unterauftrag von Polytec die Optimierungsalgorithmen entwickelt, die zur schnellen Optimierung der Signalqualität durch Aberrationen in dem Messstrahl mit Hilfe der Computergenerierten Hologramme eingesetzt wurden.

## I.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Polytec hat während des Projekts als einziger Hersteller von optischen Sensoren, Messsysteme im HoloVib-Projekt bereitgestellt und erarbeitet. Dabei konnte Polytec auf die

langjährige Erfahrung mit Laser-Doppler-Vibrometern zurückgreifen. Das Wissen über die Benutzung und Herstellung von computergenerierten Hologrammen konnte durch das ITO in das Projekt eingebracht werden. Ein Unterauftrag für die mathematische Optimierung der Hologramme wurde an die Uni Wuppertal erteilt. Wie im nächsten Abschnitt erläutert wird, hat Polytec vier Funktionsmuster realisiert. Dabei handelte es sich um zwei Einpunkt-Scanning-Vibrometer, welche zunächst die grundsätzliche Eignung von computergenerierten Hologrammen sicher stellen sollten und zwei Multipoint-Vibrometer, welche ganz neue Möglichkeiten in der Vibrometermessung eröffneten.

Außerdem wurden die Anwender (Bosch und Continental) nach der Übergabe der Funktionsmuster bei der Inbetriebnahme und ersten Messungen unterstützt. Dadurch wurde sichergestellt, dass Ideen zur Verbesserung oder Erweiterung der Funktionsmuster direkt an Polytec weiter gegeben werden konnten.

### **I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Ziel des Teilvorhabens von Polytec war die experimentelle Evaluierung von verschiedenen SLMs und danach der Aufbau von zunächst zwei scannenden Einpunkt-Vibrometern und bei viel versprechenden Ergebnissen der Aufbau von zwei Multipoint-Vibrometern. Dabei war neben dem optischen/mechanischen und elektrischen Aufbau auch die Implementierung der Geräte in die Polytec eigene PSV-Software wichtig, um eine für den Anwender wichtige Bedienerfreundlichkeit zu garantieren. Der Fortschritt während des Projekts wurde mit jeweils 6 Meilensteinen überprüft. Zum Ende des Projekts waren die Limitierungen der zurzeit verfügbaren räumlichen Lichtmodulatoren verstanden und es war klar, dass die Anforderungen der Anwender mit Hilfe dynamischer Hologramme nicht erreicht werden können. Daher wurde im Rahmen einer Verlängerung ein alternatives Konzept mit statischen Hologrammen und einer manuellen Strahlpositionierung umgesetzt und erfolgreich bei den Anwendern evaluiert.

Die Meilensteine lauteten:

#### **Meilenstein 1:** Ende Quartal 2

Erarbeitung der Wunschspezifikationen (erfolgreich abgeschlossen).  
Optikkonzept und Vorversuche (Experimentalaufbau) für scannendes Vibrometer (erfolgreich abgeschlossen).

#### **Meilenstein 2:** Ende Quartal 4

Provisorische Hologrammberechnung implementiert. (erfolgreich abgeschlossen)  
Funktionsmuster für ein kompaktes Scan-System mit CGH ist realisiert. (erfolgreich abgeschlossen)

#### **Meilenstein 3:** Ende Quartal 6

GPU-basierte Hologrammberechnung für Scan-System implementiert. (erfolgreich abgeschlossen)  
Konzept und experimentelle Verifikation (Optik und Elektronik) des Multipoint-System (erfolgreich abgeschlossen).  
Präsentation und Entscheidung über Projektfortführung. Ziel des Meilensteins ist es die Tauglichkeit der LCD-Technologie für Computer Generierte Hologramme nachgewiesen oder widerlegt zu haben. (Es wurde beschlossen, dass die Ergebnisse, die Weiterführung des Projekts rechtfertigten)

#### **Meilenstein 4:** Ende Quartal 8

Kamerabasierte Auswahl von Messpunkten und Anbindung an PSV-System für Scan-System realisiert (erfolgreich abgeschlossen)

GPU-basierte Hologrammberechnung für Multipoint-System implementiert (erfolgreich abgeschlossen).

Realisierung statischer CGHs (erfolgreich in der Verlängerung abgeschlossen).

#### **Meilenstein 5: Ende Quartal 10**

Speckle-Optimierungsverfahren implementiert (erfolgreich während der Verlängerung abgeschlossen).

Iterative automatische Lichtfeldoptimierung für Defokus und statische Aberrationen implementiert (erfolgreich während der Verlängerung abgeschlossen).

Anbindung an das PSV-System für das Multipoint-System (erfolgreich abgeschlossen).

3D Erkennung durch programmierbares Spotarray und Stereo-Vision rudimentär implementiert (nicht umgesetzt).

Alternative Vibrometerkonzepte wurden evaluiert (erfolgreich während der Verlängerung umgesetzt).

Hardware der beiden Funktionsmuster für das konfigurierbare Multipoint-System wurden realisiert (erfolgreich abgeschlossen).

Die Ergebnisse führten zu dem Resultat, dass mit der derzeitigen Technik räumlicher Lichtmodulatoren nicht die von den Anwendern geforderten Spezifikationen zu erreichen sind, allerdings konnten die Zielspezifikationen für zukünftige räumliche Lichtmodulatoren formuliert werden.

#### **Meilenstein 6: Ende Quartal 12**

Einbindung alternativer Verfahren in das Messsystem (erfolgreich während der Verlängerung abgeschlossen).

Experimentelle Verifikation der Specklereduktion und Anbindung derselben an das PSV-System (erfolgreich abgeschlossen).

Meilenstein	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Zeitpunkt M/J	09/09	03/10	09/10	03/11	09/11	03/12

Die Meilensteine wurden größtenteils eingehalten, allerdings musste, auf Grund der für die Anwender nicht ausreichenden Performance des ersten Multipoint-Funktionsmusters, das Konzept für das zweite Funktionsmuster grundlegend überarbeitet werden. Bei diesem überarbeiteten Mehrkanalvibrometer wurden keine dynamischen, sondern nur statische computergenerierte Hologramme genutzt. Deshalb war eine Verlängerung des Projektes notwendig, damit es möglich wurde, dass die Anwender mit dem überarbeiteten Mehrkanalvibrometer die Mehrkanaltechnik noch evaluieren konnten.

## **I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde**

Die Laser-Doppler-Vibrometrie [1] ist ein berührungsloses optisches Verfahren, mit dem die momentane Auslenkung oder Geschwindigkeit eines Oberflächenpunktes als Echtzeitsignal erfasst werden kann. Das Geschwindigkeitssignal wird dabei aus der Doppler-Verschiebung des zurückgestreuten Messlichts gewonnen. Mit Hilfe von Datenerfassungskarten und FFT (Fast Fourier Transform)-Technik kann für ein beliebig wählbares Zeitfenster die spektrale Schwingungsinformation gewonnen werden. Diese Messtechnik wird inzwischen in großem Umfang industriell eingesetzt. Der technische Aufwand für die Realisierung ist aber erheblich, was sich in der Größe und dem Preis der Messköpfe widerspiegelt. Da in aller

Regel die Schwingungsinformation an verschiedenen Punkten gemessen werden muss, werden in Forschung und Entwicklung scannende Vibrometer verwendet.

Bei der Scanning-Vibrometer-Technik kann durch den Einsatz eines hochfrequenten Trägersignals (in der Regel  $> 5$  MHz und  $< 1$  GHz) eine sehr hohe Intensitätsdynamik erzielt werden (Heterodynverfahren). Hiermit ergibt sich eine robuste Messung auf praktisch allen technischen Oberflächen. Bei dem heterodynen Vibrometer wird mit Hilfe einer Bragg-Zelle ein fester Frequenzunterschied zwischen Mess- und Referenzstrahl eingebracht. Auf dem Detektor entsteht dann ein Trägersignal mit der Frequenz dieses Frequenzunterschiedes. Die Demodulation des Trägers ergibt dann die richtungsgenaue Bewegungsinformation. Eine alternative Technik zur räumlich aufgelösten Schwingungsmessung ist der Einsatz von holografischen Messverfahren. Sowohl digitalholografische [2,3] als auch abbildend interferometrische Verfahren (Electronic Speckle Pattern Interferometrie [4,5], Shearographie) werden zur räumlich hochaufgelösten Messung von Schwingungen eingesetzt. Kamerabasiert lassen sich entsprechende Techniken – insbesondere bei hohen Frequenzen – nicht realisieren. Während für periodische Vorgänge Mehrpulstechniken [6] oder zeitmittelnde Verfahren [3] verwendet werden können, müssen bei transienten Vorgängen und der Analyse hochfrequenter Phänomene Hochgeschwindigkeitskameras in Verbindung mit starken Lasern (flächige Beleuchtung) zum Einsatz kommen [7]. Dabei liegen die detektierbaren Schwingungen aber auch bei teuren Kameras deutlich unter 5 kHz. Im Gegensatz zur Scanning-Vibrometer-Technik ergibt sich weiterhin eine wesentlich reduzierte Robustheit, da ein Einsatz von Heterodynverfahren bei den holografischen Messverfahren schwierig realisierbar ist. Eine preiswerte fertigungsintegrierte Inspektion entsprechender Schwingungen ist beim derzeitigen Stand der Technik daher mit flächenhaften holografischen Messverfahren nicht realisierbar.

In der Regel ist für die fertigungsintegrierte Inspektion keine räumlich höchstauflösende Schwingungssensorik notwendig. Stattdessen ist eine hochauflösende Schwingungsmessung an vergleichsweise wenigen (10 bis 100) Punkten auf dem Werkstück in aller Regel ausreichend. Beim Stand der Technik wird mit Hilfe von Galvo-Scanner-Spiegeln die Messoberfläche punktweise abgerastert, um so die Schwingungsinformation einer ganzen Oberfläche zu erfassen. Problematisch sind hierbei aber – wie auch bei den holografischen Verfahren – transiente Vorgänge, die sich nicht reproduzieren lassen. Solche Vorgänge treten bei vielen technischen Messproblemen in der Fertigung auf. Zur Lösung dieser Problematik kann das Licht gezielt auf Messpunkte eingestrahlt werden. Würde das Objekt großflächig beleuchtet, wären erheblich stärkere Laser notwendig, wodurch nicht mehr die akzeptable Laserklasse für Messsensoren (Klasse 2 oder hier 2M) eingehalten werden kann. Das quantitative Messen von Schwingungen muss daher an bestimmten Messpunkten erfolgen.

Ein Vibrometer mit mehreren Messstrahlen zur Bestimmung von Schwingungsformen wurde erstmals 2002 vorgestellt [8]. Dieses Multipoint-Vibrometer hat ein festes Messpunktgitter (eine Linie) und funktioniert nach dem homodynen Laser-Doppler-Detektionsprinzip. Es wird optisch ein Quadratursignal des Detektorsignals erzeugt, aus welchem die Bewegung richtungsgenau demoduliert werden kann. Im gleichen Jahr wurde von Lal et al. ein Multipoint-Vibrometer nach dem heterodynen Verfahren vorgestellt [9], mit welchem ebenfalls ein festes Messpunktgitter in einer Linie erzeugt wurde. Von der Firma Metrolaser Inc. (Irvine, USA) wird ein entsprechendes System zur Schwingungsmessung mit statischen Punkterastern angeboten. Ein statisches Messpunkteraster schränkt die Anwendung aber erheblich ein. Sinnvolle fertigungsintegrierte Kontrollen sind in der Regel nur mit einem vom Anwender frei wählbaren Punkteraster realisierbar. Entsprechende Systeme sind nicht bekannt.

Holografische Strahlableitungsmethoden sind seit längerer Zeit (meist durch rotierende statische Elemente [10] oder durch photorefraktive Kristalle [11]) bekannt. Ein praktikabler Einsatz im industriellen Umfeld ohne Mechanik ist durch den Einsatz moderner

Lichtmodulatoren möglich. Verschiedene Anwendungen im Bereich der Mikroskopie [12] und optischen Messtechnik [13] wurden bereits realisiert. Ein Schwerpunkt des Einsatzes sind momentan holografische Pinzetten. Ein Einsatz mit extremen Anforderungen an die Reduktion des Störlichts (ungewollte Beugungsordnungen und Reflexionen) ist bisher nicht bekannt.

Daher wurden in der Vergangenheit viele Verfahren zur schnellen Berechnung von Hologrammen vorgestellt. Hierbei können zwei Hauptansätze unterschieden werden. Bei der rein algorithmischen Beschleunigung versucht man durch geeignete Näherungen die Anzahl der für die Berechnung notwendigen Operationen zu verringern. Bei der hardware-basierten Beschleunigung wird Spezialhardware eingesetzt, die eine Berechnung beschleunigen soll [14]. Von besonderer Bedeutung sind hier Speziallösungen wie der Einsatz von preiswert verfügbaren Grafikkarten, die aufgrund der hochgradigen internen Parallelisierung ebenfalls erhebliche Beschleunigungen erzielen [15].

- [1] G.A. Massey, Proc. IEEE 51, 1246 (1968).
- [2] U. Schnars, W. Jüptner, "Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques", Springer (2004).
- [3] Leval et al., Applied Optics 44, S. 5763-5772 (2005).
- [4] Perdini et al., Technisches Messen 72, S. 172-179 (2005).
- [5] Jones, Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry" Cambridge Univ. Press (1989)
- [6] Chambard et al., Optics & Lasers in Engin. 38, S. 131-143 (2002).
- [7] Buckberry et al., Opt. & Lasers in Engin. 32, S. 387-394 (2000).
- [8] E. Cupido, D. Smith, S. Morel, "A Novel Multipoint Laser Doppler Vibrometer", Int. Conf. on noise & Vibration Engineering, Leuven, Belgium, Sept. 16-18, (Proc. ISMA 2002, Vol. II), pp. 655.661
- [9] Lal et al., SPIE 4742, 640 (2002).
- [10] D. Schreier, Synthetische Holografie, Physik-Verlag Weinheim 1984
- [11] L. Pugliese, G. M. Morris, Opt. Lett. 15, S. 338, 1990.
- [12] S. Bernet, et al., Opt. Express 14, 3792-3805, 2006.
- [13] G. Wernicke et al., Proc. Fringe, S. 480-487, 2005.
- [14] T. Ito et al., Opt. Express 13, 1923-1932, 2005.
- [15] T. Haist et al., Computing in Science and Engineering 8, S. 8-13, 2006
- [16] O. Schreer, Stereoanalyse und Bildsynthese, Springer, 2005

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Polytec hat eng mit dem Institut für technische Optik (ITO) der Universität Stuttgart zusammengearbeitet, um die vier Funktionsmuster zu realisieren. Dabei wurden die SLMs in enger Zusammenarbeit ausgewählt sowie charakterisiert und später der optische Aufbau der Funktionsmuster entworfen. Dabei wurden optische Simulationen mit ZEMAX für den optischen Strahlengang und ASAP für eine Streulichtanalyse durchgeführt. Zu diesem Thema wurde z.B. eine Diplomarbeit vergeben und gemeinsam durch das ITO und Polytec betreut. Außerdem wurde beim ITO die für das zweite Multipoint-Funktionsmuster nötigen Hologramme nach Vorgaben von Polytec berechnet und anschließend in der hauseigenen Fertigung hergestellt. Des Weiteren lieferte das ITO die grundlegenden Programmierschnittstellen für die SLMs in Form von DLL-Dateien, welche dann von Polytec in die PSV-Software implementiert werden konnten. Dadurch konnte eine, für den Anwender bereits vertraute, Benutzeroberfläche für die Verwendung der Funktionsmuster realisiert werden.

Ein Unterauftrag für die Erarbeitung eines mathematischen Algorithmus zur Speckle-Optimierung wurde an die Universität Wuppertal vergeben. Dieser Algorithmus wurde in

Zusammenarbeit mit Polytec in die PSV-Software eingebunden, womit man wiederum einen hohen Bedienkomfort für den Anwender erreichen konnte.

Neben den universitären Partnern gab es noch die Firmen Bosch und Continental welche als Anwender bei diesem Projekt eingebunden waren. Mit Ihnen zusammen konnte Polytec zunächst die für die Anwender essentiellen Anforderungen an die Funktionsmuster erarbeiten, wodurch sichergestellt wurde, dass diese auch einen praktischen Nutzen haben werden. Des Weiteren wurden reale Testobjekte bereitgestellt, welche für die ersten Testmessungen bei Polytec und am ITO verwendet werden konnten. Die Industriepartner führten mit den verschiedenen Funktionsmustern, unterstützt durch Polytec, Messungen an unterschiedlichsten Objekten durch, um die Geräte ausgiebig zu charakterisieren. Die so gesammelten Ideen und Anregungen zur Verbesserung der Geräte wurden soweit möglich im Laufe des Projekts umgesetzt, wodurch ein stetiger Verbesserungsprozess der Funktionsmuster stattfand.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

Innerhalb des Teilvorhabens Laser-Doppler-Vibrometer mit Computer Generierten Hologrammen (CGH) zur Konfigurierung von Messpositionen wurden im Verbundvorhaben Holovib zwei verschiedene Funktionsmuster erarbeitet:

1. Ein kompaktes Scanning-Vibrometer mit einem Spatial Light Modulator (SLM). Das SLM dient zum Fokussieren und Rastern des Messstrahls. Mit diesem Funktionsmuster sollten Limitierungen und Möglichkeiten der Computergenerierten Hologramme in der Laser-Doppler-Vibrometrie und die Möglichkeit der Speckleoptimierung untersucht werden. Dabei wurden zwei Einpunkt-Vibrometer mit SLMs aufgebaut, und insgesamt drei verschiedene SLMs getestet: Zwei von der Ansteuerung (analog bzw. digital) verschiedene LCoS-Displays (Liquid Crystal on Silicon) von Hamamatsu bzw. HOLOEYE und eine Membranspiegel von OKOTech.
2. Ein neuartiges Mehrstrahlvibrometer mit konfigurierbarem Messpunkteraster zum Vermessen nicht reproduzierbarer oder instationärer Vorgänge. Dabei wurden zwei Multipoint-Vibrometer gebaut, wobei eines mit einem steuerbaren SLM realisiert wurde (14 Messpunkte) und eines mit festen Hologrammen (12 Messpunkte). Beide Geräte wurden so realisiert, dass prinzipiell eine Erhöhung der Anzahl der Messpunkte durch ein Zusammenschalten mehrerer gleicher Geräte und die Synchronisation der Datenerfassung durch ein Taktsignal möglich ist.

Die Ergebnisse bei der Erarbeitung der beiden Funktionsmuster werden in diesem Abschnitt separat erläutert.

#### ***II.1.1 Funktionsmuster 1a und 1b – Einpunkt-Vibrometer mit SLM***

##### **II.1.1.1 Geplante Projektergebnisse**

Im Arbeitspaket 1.1 sollten die Einflüsse des SLM auf das Laser-Dopplervibrometer-Signal untersucht werden. Aufgrund der Ergebnisse sollte ein geeignetes SLM ausgesucht werden und dafür die optimale Ansteuerung ermittelt werden. Für das Rastern des Messstrahls musste ein Optimum zwischen Numerischer Apertur und Scanwinkel gefunden werden. Ausgehend von diesen Ergebnissen sollten zwei Funktionsmuster für ein Scanning-

Vibrometer mit SLM realisiert werden und an die Anwender übergeben werden. Des Weiteren sollte eine Software zum Scannen mit Hologrammen und ein Algorithmus zum Unterdrücken von Speckle-Drop-Outs entwickelt werden, welche mit den Einpunkt-Messköpfen validiert werden sollte.

## II.1.1.2 Erreichte Projektergebnisse

### Vorversuche und Konzepte

In der Vorversuchs- und Konzeptphase wurde eine Recherche zu verschiedenen Arten von Spatial Light Modulators (SLMs) durchgeführt. Die SLMs ließen sich hierbei in verschiedene Klassen einteilen. Eine Klasse von SLMs basiert auf Piezoaktoren, welche in einem regelmäßigen Raster unter einer dünnen spiegelnden Membran angebracht sind. Durch Ansteuern verschiedener Piezos kann die Membran nahezu beliebig verformt und somit eine einfallende Lichtwellenfront beeinflusst werden. Diese Systeme haben den Vorteil einer kontinuierlichen, stetigen Phasenfläche. Darüber hinaus ist es möglich auch mit nicht linear polarisiertem Licht arbeiten zu können. Die Systeme sind kommerziell verfügbar, jedoch nur in kleineren Stückzahlen und sehr teuer. Je nach Anzahl der Aktuatoren steigt der Preis und die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Phasenfront sind begrenzt, so dass freiprogrammierbare Phasenhologramme nicht möglich sind. Solche spiegel sind für die Signalpegeloptimierung interessant. Weiterhin gibt es MEMS Mikrospiegel Lichtmodulatoren (z.B. vom Fraunhofer IPMS) [16], bei denen die Auslenkung von einzelnen kleinen Mikrospiegeln über einen MEMS Antrieb variiert und somit eine nahezu beliebige Phasenfront erzeugt werden kann. Ein Vorteil dieser SLM ist, dass diese auch mit unpolarisiertem Licht funktionieren. Ein solches SLM eignet sich nicht für die Strahlpositionierung, ist aber für die Unterdrückung von Signalaussetzern durch Speckleoptimierung interessant. Mikrospiegelarrays von Texas Instruments können über Abschattungen nur Amplitudenhologramme realisieren.

Eine weitere Möglichkeit stellen LCoS (Liquid Cristal on Silicon) Mikrodisplays dar. Die LCoS Technologie beruht auf einer aktiven Pixelstruktur aus Flüssigkristallen auf einem Siliziumsubstrat. Durch Ansteuern einzelner Pixel können die darüber liegenden Flüssigkristall-Zellen beeinflusst werden. Je nach Art des Flüssigkristalls und des Aufbaus können die LCoS Displays auf verschiedene Arten Licht modulieren. So gibt es LCoS Displays, welche die Helligkeit modulieren, oder Displays mit denen eine Phasenmodulation/-verschiebung des Lichts möglich ist. Alle kommerziell verfügbaren LCoS SLMs ermöglichen eine einfache Ansteuerung über eine DVI Grafikschnittstelle. Da DVI sich zu einem Standard für den Anschluss von TFT-Monitoren an Grafikkarte eines Computers entwickelt hat, ist diese nahezu in jedem PC vorhanden. Sie stellt somit eine universelle Möglichkeit zum Anschluss von SLMs über den zweiten DVI Ausgang an einer Grafikkarte dar. Die relativ niedrige Bildwiederholungsfrequenz von 60 Hz ist für die meisten Anwendungen ausreichend und wirkt sich nicht negativ auf die Performance eines Scanning Vibrometers aus. Für das Multipoint-System ist dieser Parameter eine untergeordnete Größe, da hier das Hologramm vor der Messung nur einmal fest eingestellt werden muss. Aufgrund des möglichen Phasenhubs von  $> 2\pi$  (@633 nm) können mit LCoS SLMs zurzeit die größten Ablenkwinkel erreicht werden, was sie für den Einsatz in einem Scanning Vibrometer bzw. einem Mehrstrahlvibrometer favorisiert. Durch die Phasenhologramme kann außerdem eine Fokussierung des Laserstrahls realisiert werden. Temperaturempfindlichkeit und Langzeitstabilität des Phasenverlaufs der LCoS SLMs müssen für Anwendungen der SLMs in der Laser-Doppler-Vibrometrie jedoch noch näher untersucht werden.

Für die Evaluierung wurden nun verschiedene SLMs auf Basis der LCoS Technologie auf die Eignung für den Einsatz in der Vibrometrie untersucht. Insbesondere wurden SLM evaluiert, welche für jedes Pixel die Lichtphase verzögern können. Die Phasenkarten werden in der Regel über Grauwertbilder dargestellt und der Ansteuereinheit des SLM übergeben.

Da LCoS SLMs zur Phasenmodulation bisher noch ein Nischenprodukt sind, gibt es zurzeit nur wenige kommerziell verfügbare Systeme:

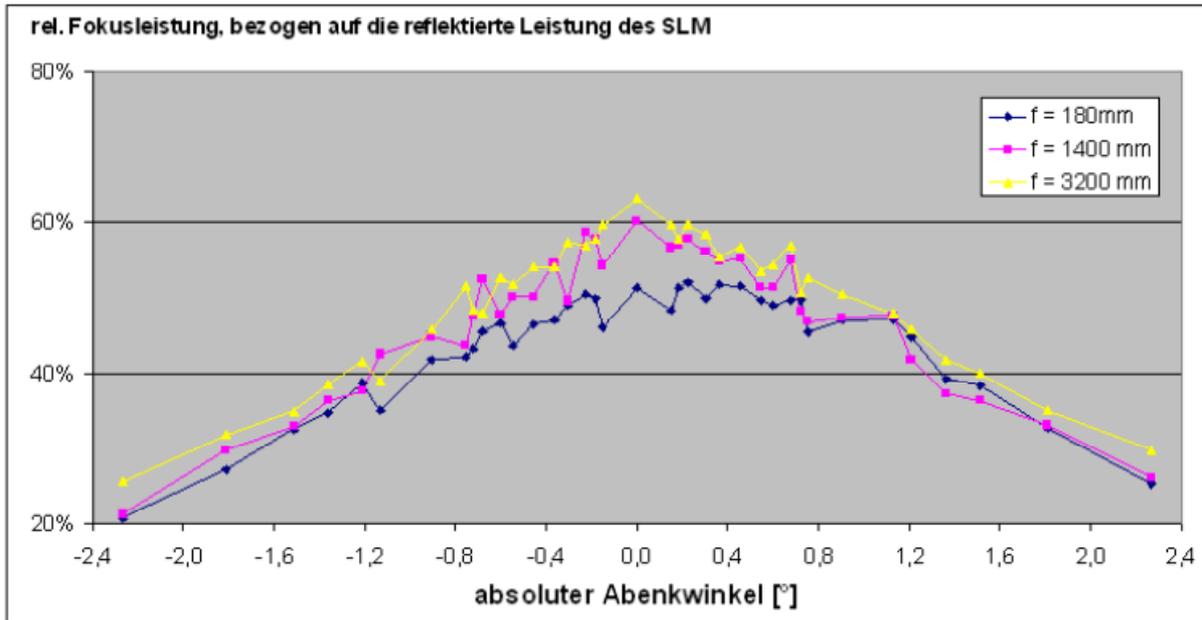
- HoloEye PLUTO Phase Modulator
- Bould Nonlinear Systems (BNS-XY-PH-P512)
- HAMAMATSU x10468 Serie
- Cambridge Corralators SDE1280

Als potenzielle kostengünstige Alternative wurde das von Cambridge Corralators angebotene SLM untersucht. Das Boulder Nonlinear Systems SLM wurde bei Polytec nicht als Möglichkeit für das HoloVib Projekt in Betracht gezogen, da es aufgrund des relativ hohen Preises keine Perspektive für eine spätere kommerzielle Verwertbarkeit gibt. Dieses SLM wurde vom Projektpartner ITO untersucht, wobei sich hier keine zufriedenstellenden Eigenschaften ergaben. Neben dem SLM von Cambridge Corralators wurden die SLMs von HoloEye und HAMAMATSU näher auf die Eignung für den Einsatz in der Laser Vibrometrie untersucht. Alle drei SLMs lassen sich auf einfachem Weg über eine Standard-DVI-Schnittstelle ansteuern. Bei den Untersuchungen wurden folgende Parameter evaluiert, die für den Einsatz der SLMs in der Laser-Doppler-Vibrometrie relevant sind:

- Maximaler Phasenhub, Linearität des Phasenverlaufs
- Reflektivität
- Beugungseffizienz
- Pixelanzahl und Pixelgröße, wichtig für einen großen Ablenkwinkel
- Einfluss auf das Spektrum des Vibrometersignals/Störeinflüsse

Ein maximaler Phasenhub von  $2\pi$  gewährleistet hierbei eine hohe Beugungseffizienz und großen Ablenkwinkel. Ein linearer Phasenverlauf in Abhängigkeit der Grauwerte ist die Voraussetzung für eine einfache Hologrammrekonstruktion. Im Fall einer nichtlinearen Kennlinie müssten sonst stets die Grauwerte der eingeschriebenen Hologramme angepasst werden. Damit der vom SLM gebeugte nutzbare Messstrahl (aus Effizienzgründen wird die 1. Ordnung verwendet) eine hohe Intensität aufweist, ist eine hohe Reflektivität des SLMs notwendig. Die Reflektivität ist hierbei der Quotient der Intensitäten des reflektierten Strahls ohne eingeschriebenes Hologramm zur Intensität des einfallenden Strahls. Pixelanzahl und Pixelgröße bestimmen weiterhin die kleinstmögliche Gitterkonstante die realisiert werden kann und somit ebenfalls die Größe des Ablenkwinkels für das Scanfildes des Scanning Vibrometers. Mit steigendem Winkel sinkt allerdings die Beugungseffizienz wie das Messergebnis HoloEye Pluto-SLM in Abb. 1 zeigt.

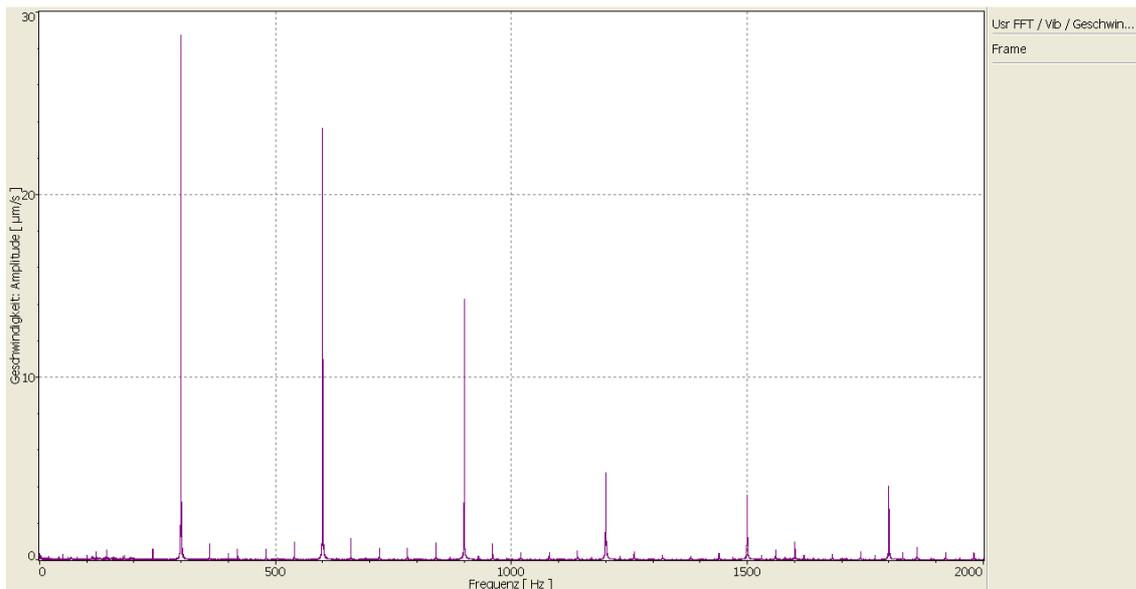
Neben der Evaluierung der oben genannten relevanten Parameter der SLMs wurde weiterhin der Einfluss auf das Spektrum des Vibrometersignals untersucht. Die digitale PWM-Ansteuerung der Pixelzellen des SLMs verursachen hierbei Störlinien im Geschwindigkeitsspektrum des Vibrometers. Je nach Ansteuerung des SLMs kann durch die Modulation des Signals die Phase einer reflektierten Lichtwellenfront hochfrequent moduliert werden, was vom Vibrometer als Phasenmodulation registriert wird und zu Störlinien im Geschwindigkeitsspektrum führt. Die Störlinien sind dabei abhängig vom eingeschriebenen Hologramm. Die Störlinien sind unerwünscht, da diese je nach Höhe eine Messung negativ beeinflussen können. Größe und Lage der Störlinien sind ausschlaggebend für den Einsatz des SLMs in der Vibrometrie.



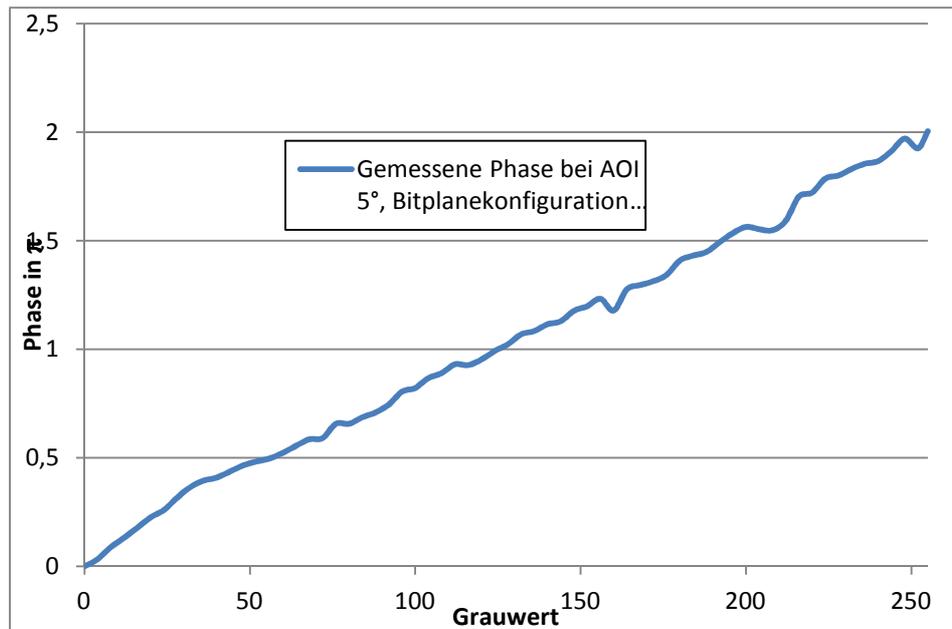
**Abb. 1:** Relative Strahlungsleistung im Fokus als Funktion des Ablenkwinkels bei verschiedenen Brennweiten. Die gemessene Stahlleistung wird bezogen auf die reflektierte Leistung des SLM im nicht-angesteuerten Zustand von  $P_{refl} = 450\mu W$

*Ergebnisse beim HoloEye Pluto*

Durch das Ansteuersignal des SLMs treten zwar Störlinien im gemessenen Geschwindigkeitsspektrum des Vibrometers auf, allerdings sind die Höhen so, dass es für die meisten Applikationen vertretbar sein sollte (siehe Abb. 2). Durch die relativ hohe Pixelzahl von  $1920 \times 1020$  ermöglicht das SLM relativ hohe Scanwinkel bei ausreichend hoher Numerischer Apertur des Vibrometermessstrahls. Es wurde eine OEM Varianten des Pluto Phase Modulators für das Projekt angeschafft, der genau analysiert wurde und im Funktionsmuster des kompakten Scan-Systems verbaut wurde.



**Abb. 2:** HoloEye Pluto SLM: Störlinien im Geschwindigkeitsspektrum des Vibrometers im Bereich von 0-2kHz



**Abb. 3: Gemessener Phasenverlauf des HoloEye Pluto SLMs bei 5° Einfallswinkel, Bitplane Konfiguration 5-5 und angepasster Gammakurve.**

#### Ergebnisse HAMAMATSU x10468

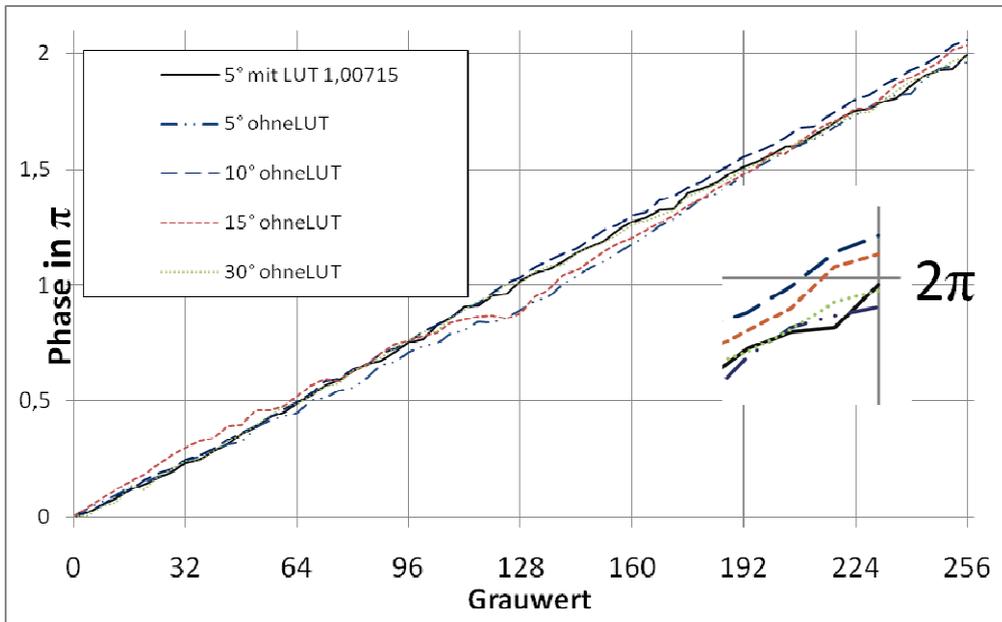
Im Rahmen des Projektes wurde außerdem ein HAMAMATSU SLM vom Typ x10468-01 untersucht. Das SLM wurde von HAMAMATSU als Testmuster zur Verfügung gestellt. Dieses SLM ist breitbandig für einen Wellenlängenbereich von 400 – 700 nm ausgelegt und besitzt eine entsprechende Antireflexschicht auf dem Eintrittsfenster. Vorteile dieses SLM sind die analoge Ansteuerung, welche zu sehr niedrigen Störlinien im Geschwindigkeitsmesssignal führt (siehe Abb. 4). Der hohe Füllfaktor gewährleistet weiterhin eine hohe Beugungseffizienz.



**Abb. 4: HAMAMATSU x10468: Störlinien im Geschwindigkeitsspektrum gemessen Bereich von 0-2kHz**

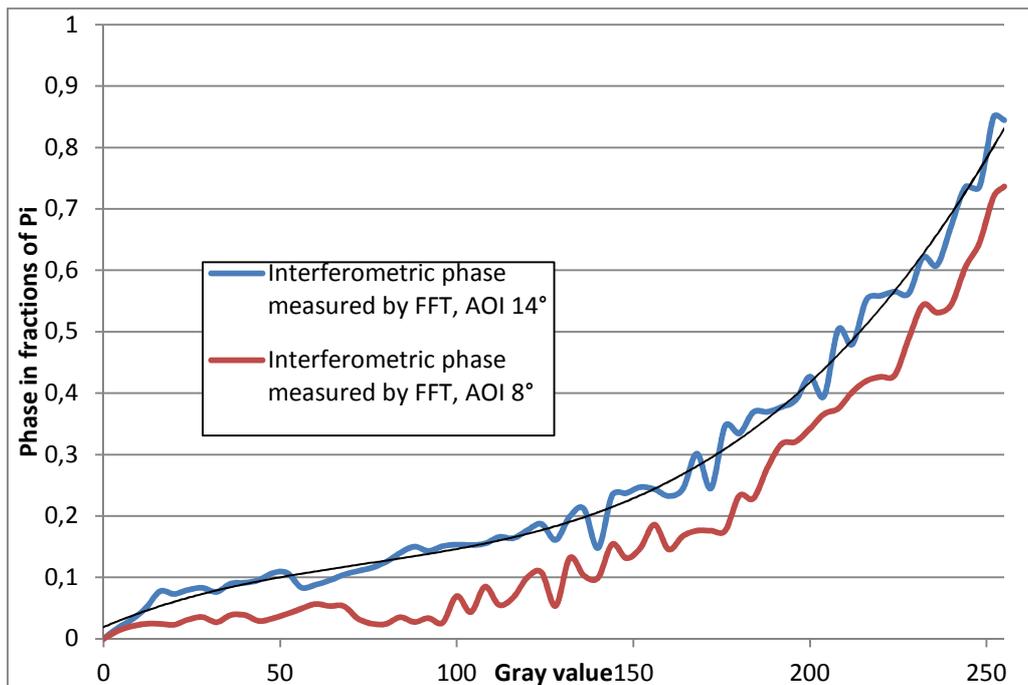
Nachteil ist die niedrige Pixelanzahl von 800 x 600 Pixel bei 20 µm Pixelgröße. Dadurch ergibt sich ein geringer Ablenkwinkel von unter 1°. Das SLM ist bereits vorlinearisiert. Es wird eine Look Up Table (LUT) verwendet welche eine Umrechnung der Steigung der Linearisierungskurve auf die jeweilige Wellenlänge ermöglicht. Erreicht wird dies durch einen Wellenlängenkorrektur der Steigung der Linearisierungskurve in der Look-up-Table. Bei den

ermittelten Phasenwerten fiel auf, dass der von Hamamatsu mitgelieferte Wellenlängenkorrekturfaktor für 633nm in der LUT nicht korrekt ist. Eine Anpassung des Korrekturwerts durch eine Reduzierung des Phasenhubs auf  $2\pi$  wurde durchgeführt. Erst dann war es möglich die Phase linear über 256 Schritte um maximal  $2\pi$  zu verschieben.



**Abb. 5: Gemessener Phasenverlauf des HAMAMATSU x10468 SLMs für verschiedene Einfallswinkel mit und ohne Wellenlängenkorrektur der Linearisierung**

Anfang 2010 hat HAMATSU eine OEM Variante des SLMs auf den Markt gebracht, welche die oben genannten Einschränkungen nicht mehr hatte. Die geringen Störlinien im Vibrometer Spektrum und die hohe Beugungseffizienz machen das Element auch trotz des eingeschränkten Ablenkwinkelbereichs interessant. Daher wurde das SLM von Hamamatsu in eines der beiden Funktionsmuster für ein Rastervibrometer eingebaut.



**Abb. 6: Gemessener Phasenverlauf des Cambridge Correlators SLMs für verschiedene Einfallswinkel**

### Ergebnisse Cambridge Correlators SLM

Der Maximaler Phasenhub von  $0,88 \pi$  (siehe Abb. 6) ist für Phasenhologramme mit ausreichender Beugungseffizienz nicht ausreichend. Ein ausreichend großer Ablenkwinkel kann nur durch ein Binärgitter erreicht werden, was jedoch ein Leistungsverlust der Nutzordnung durch die höheren Ordnungen zur Folge hat. Weiterhin wurde ein Fehler in der Ansteuerung festgestellt. Die Auflösung der Grafikschnittstelle entspricht nicht der generischen Auflösung des SLMs von  $1280 \times 720$  Pixel. Dies macht eine komplizierte Umrechnung der Hologramme notwendig. Tab. 1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten evaluierten Eigenschaften der verschiedenen LCoS SLMs.

	<b>Cambridge Correlators SDE1280</b>	<b>Holoeye PLUTO Phase Modulator</b>	<b>Hamamatsu x10468-01</b>	<b>Boulder BNS-XY-PH-P512</b>
Auflösung (Pixel)	1280 x 720	1920 x 1080	800 x 600	512 x 512
Pixel Pitch ( $\mu\text{m}$ )	9,5	8,0	20	15
Max. Ablenkwinkel	$1,91^\circ$ (theoretisch)	$2,27^\circ$ (gemessen)	$0,91^\circ$ (gemessen)	$1,2^\circ$ (theoretisch)
Störfrequenz	-	300Hz	240Hz, 280Hz	-
Amplitude Störfrequenz	-	$\sim 28 \mu\text{m/s}$	$\sim 7 \mu\text{m/s}$	-
Beugungseffizienz. (Beugungsgitter mit 8 Phasenwerten)	$\sim 40\%$	69%	85%	66%
max Störordnungen	?	10%	2%	39%
Reflektivität	$68\% @ 5^\circ$	60%	$75\% @ 5^\circ$	90%
max. Phasenschiebung	$0,85\pi$	$> 2\pi$	$> 2\pi$	$> 2\pi$
Preis (€)	1000	8300	8000-10.000 (OEM Variante)	20.000

**Tab. 1: Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen LCoS SLMs**

Das SLMs wird als Phasenmodulator verkauft, ist aber vermutlich einen Amplitudenmodulator. Bei entsprechender Ausrichtung der Eingangspolarisation wirkt dieser Amplitudenmodulator wie ein  $\lambda/2$  Platte und ermöglicht somit Phasenverzögerung im gemessenen Bereich. Für das Cambridge Correlators SLM wurde das Störverhalten nicht untersucht, da es aufgrund der obengenannten Eigenschaften nicht für die Verwendung im Projekt in Frage kommt.

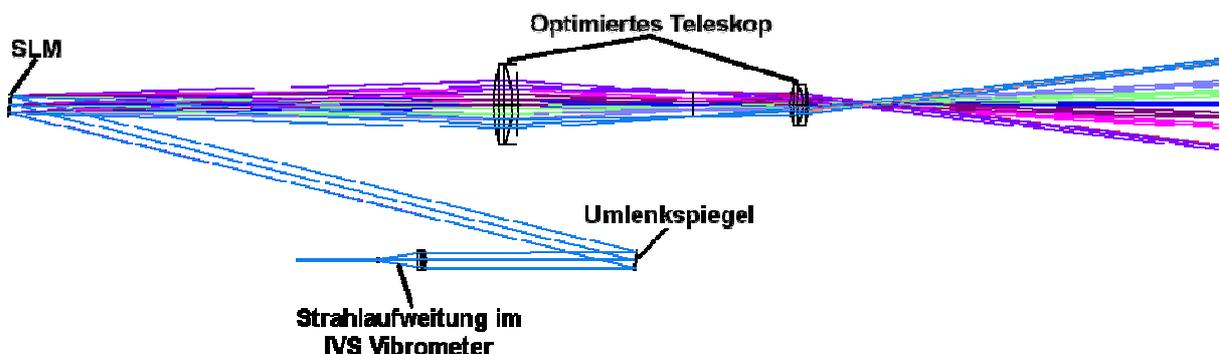
### Erarbeitung der Funktionsmuster

Auf Basis der Ergebnisse der Voruntersuchungen der verschiedenen SLMs wurde beschlossen zunächst ein Funktionsmuster mit dem HoloEye Pluto SLM zu realisieren, da dieses SLM zurzeit den besten Kompromiss bei den gewünschten Anforderungen darstellt. Weiterhin besitzt der Projektpartner ITO bereits vielseitige Erfahrung in der Anwendung dieses SLM und der entsprechenden Hologrammberechnung.

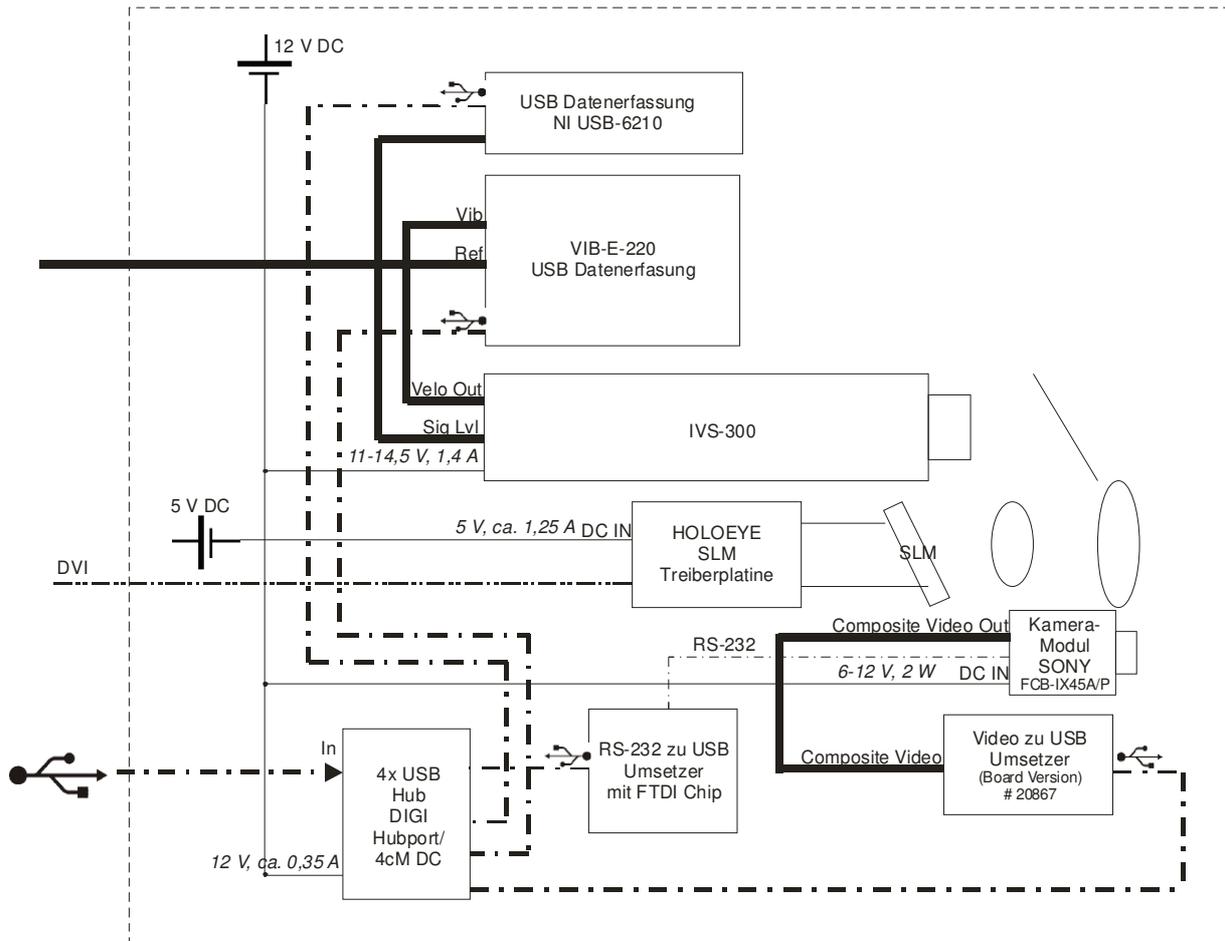
Mit dem HoloEye PLUTO Phase Modulator lässt sich, bei einer hinreichenden Beugungseffizienz, ein maximaler Ablenkwinkel von etwa  $\pm 1,13^\circ$  realisieren. Um das gewünschte Messfeld von  $30 \times 30 \text{ cm}$  bei  $2 \text{ m}$  Arbeitsabstand abdecken zu können muss ein Winkel von  $\pm 4,3^\circ$  erreicht werden. Zur Vergrößerung des Ablenkwinkels muss ein Teleskop eingesetzt werden, um diesen Ablenkwinkel zu erreichen. Der Durchmesser des SLM und der Arbeitsabstand bestimmen die mögliche Numerische Apertur des Messstrahls. Mit Hilfe des Teleskops kann der Ablenkwinkel auf Kosten der Numerischen Apertur vergrößert werden. Eine Verdopplung der Ablenkwinkels halbiert dabei die Numerische Apertur.

Ein optimiertes Design für ein entsprechendes Teleskop wurde vom Projektpartner ITO zur Verfügung gestellt. Die Vergrößerung ist dabei so ausgelegt, dass auch mit dem kleineren Ablenkwinkel des HAMAMATSU SLMs das gewünschte Messfeld abgedeckt werden kann. Auf Basis des Teleskops, wurde ein Optikdesign entworfen, welches schließlich für die Konstruktion des Funktionsmusters verwendet wurde. Eine Skizze des simulierten Strahlengangs ist in

Abb. 7 zu sehen. Die Konstruktion ist so ausgelegt worden, dass das SLM von HoloEye für Testzwecke durch das System von HAMAMATSU ersetzt werden kann. Im Zuge der weiteren Untersuchungen auf Basis der Funktionsmuster ist dann auch der Einsatz des HAMAMATSU SLMs vorgesehen. Zu Validieren ist hierbei, ob der Vorteil der kleineren Störlinien des HAMAMATSU SLMs im Geschwindigkeitsspektrum gegenüber dem Nachteil des geringeren Ablenkwinkels überwiegt.

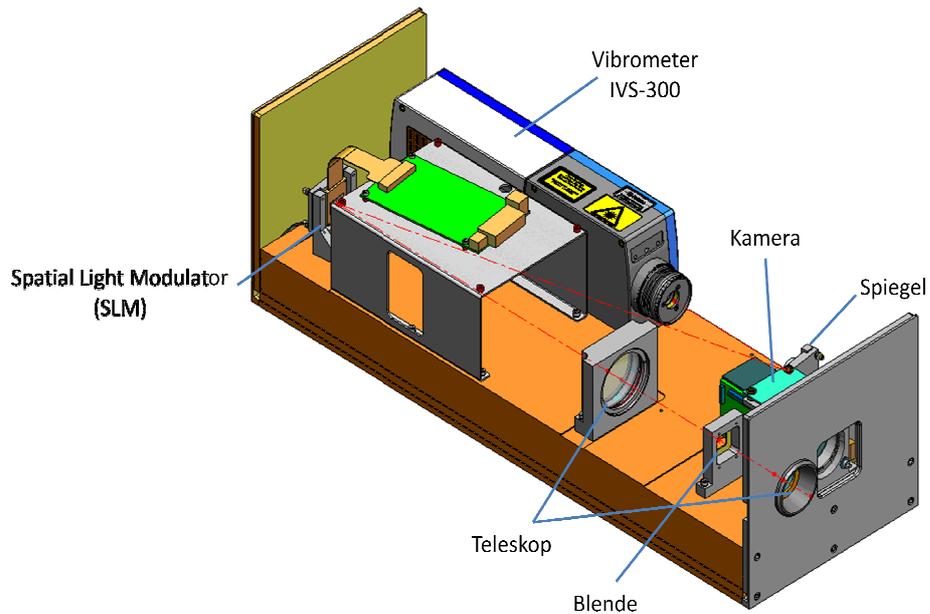


**Abb. 7: Skizze des simulierten Optikdesigns für das Funktionsmuster des Scanning Systems**



**Abb. 8: Blockschaltbild der internen Elektronik des Scanning Vibrometers**

Um den Austausch der Funktionsmuster des Scanning Systems für die weiteren Untersuchungen im Rahmen des Projektes zu vereinfachen ist das System integral konstruiert worden. Dabei wurden alle notwendigen Elektronikkomponenten und die Datenerfassung in den Kompakt Scanning Messkopf integriert. Dadurch sind für das Betreiben des Systems mit dem Auswerterechner nur ein DVI und ein USB Kabel notwendig. Als Auswerterechner dient ein leistungsfähiges Notebook, welches mit einem leistungsfähigen Grafikprozessor ausgestattet ist, der später die Berechnung der Hologramme übernimmt. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das Blockschaltbild der Elektronik des Scanning Systems. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist ein Bild des CAD Modells zu sehen.



**Abb. 9: CAD Modell Funktionsmuster Scanning Vibrometer**

Die Fertigung und Aufbau der beiden Scanning Vibrometer Funktionsmuster wurde in Q2 2010 abgeschlossen und dann an die Anwender bzw. an die Universitätspartner übergeben.

Ein Foto vom realisierten Funktionsmuster ist in Abbildung 10 zu sehen.



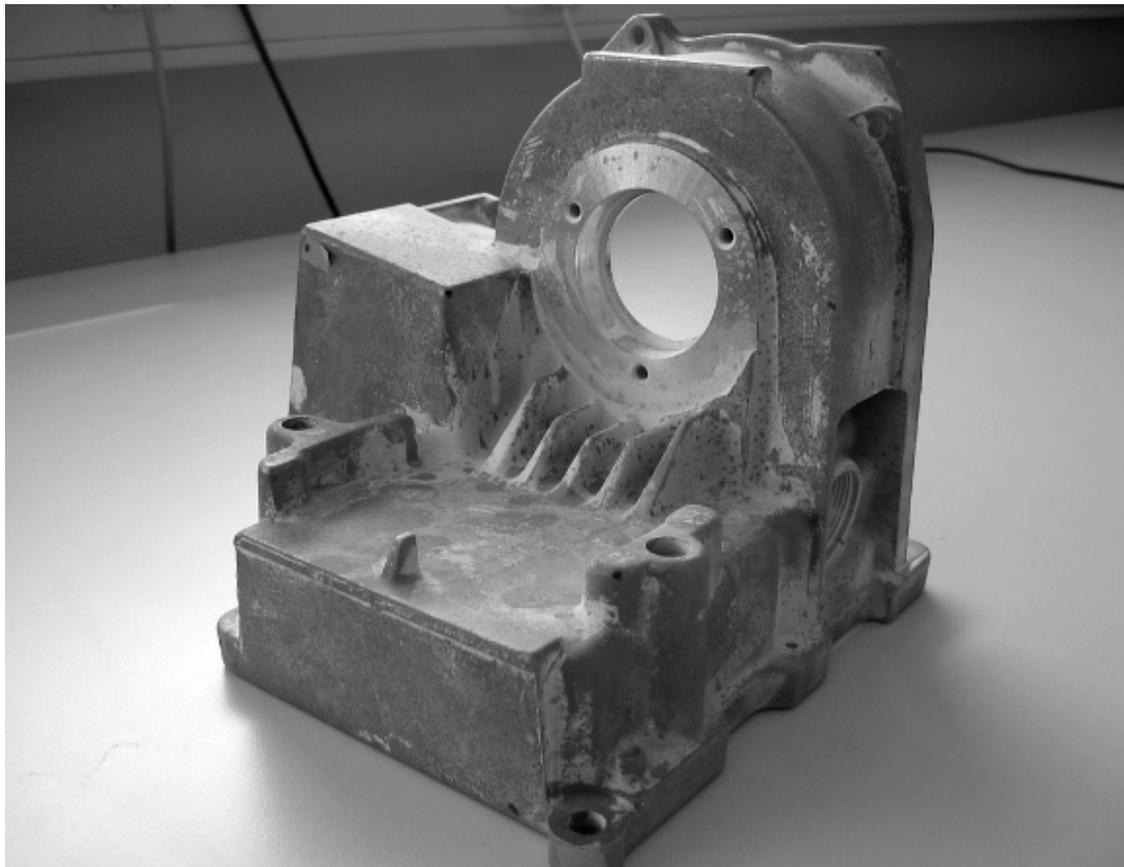
**Abb. 10: Foto vom Funktionsmuster 1a ohne eine Haube.**

Im späteren Verlauf des Projektes wurde ein Funktionsmuster umgerüstet und das LCoS SLM durch einen Membranspiegel ersetzt. Damit war zwar keine Strahllenkung mehr möglich, allerdings konnte der Membranspiegel wesentlich schneller angesteuert werden und wies auch keine Störlinien im Spektrum auf, wie es bei den LCoS SLMs der Fall war. Dadurch eignete sich dieser Spiegel wesentlich besser für die Speckleoptimierung.

#### Software zum Scannen und zur Signalpegeloptimierung

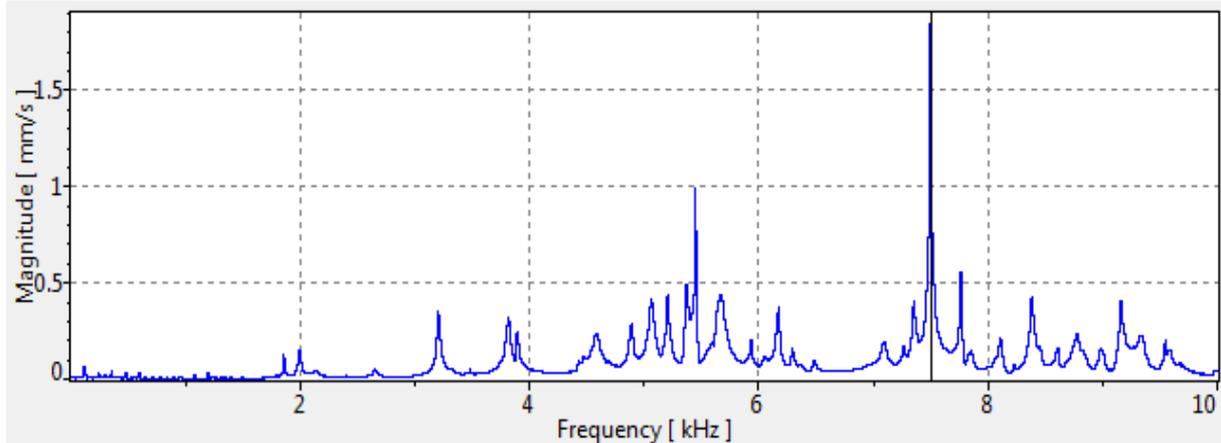
Die Integration der Algorithmen zur Hologrammberechnung in die Vibrometersoftware erfolgt mit Hilfe einer DLL (Dynamic Link Library). Die DLL berechnet das entsprechende Hologramm zur Erzeugung eines oder mehrerer Einzelstrahlen, die abgelenkt, fokussiert und auf weitere Art und Weise modifiziert werden sollen. Die DLL für die Hologrammberechnungen nutzt den Prozessor der Graphikkarte mittels der CUDA-API von NVIDIA als Co-Prozessor. Die Basisfunktionalität des Messstrahls wird vom Benutzer über ein Basic Makro bedient, wobei das inzwischen vom Partner Bosch noch optimierte Makro, den Laserfokus und den Winkel an die DLL vom ITO übergibt. So kann der Laserfokus auf verschiedene Positionen im Kamerabild der PSV-Software abgelenkt und fokussiert werden.

Der Abgleich zwischen Kamerabild und Winkel erfolgt dann durch Markieren des Laserspots in dem Kamerabild der PSV-Software im Alignment-Modus. Somit können einem (in der PSV-Software definierten) Messgitter Winkel zugeordnet werden. Der Fokus wird in eine Ebene gelegt und dann wird beim Starten einer Messung das Gitter abgerastert und mit der PSV-Software an jedem Scanpunkt ein Schwingungsspektrum aufgenommen. Die Geschwindigkeit der Berechnung auf der Grafikkarte ist hierbei ausreichend, um die Hologramme mit der Bildrate des SLMs (60 Hz) zu berechnen. Eine erste Messung wurde an der Abbildung 11 dargestellten Getriebeglocke durchgeführt.



**Abb. 11: Foto der in einer ersten Messung untersuchten Getriebeglocke.**

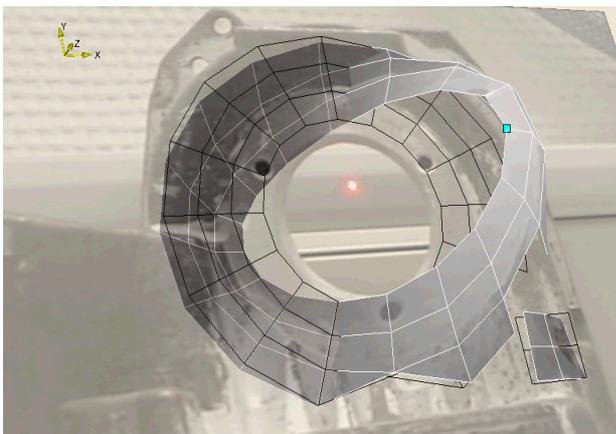
Das gemittelte Spektrum der Scanning-Messung mit dem Funktionsmuster ist in Abbildung 12 zu sehen.



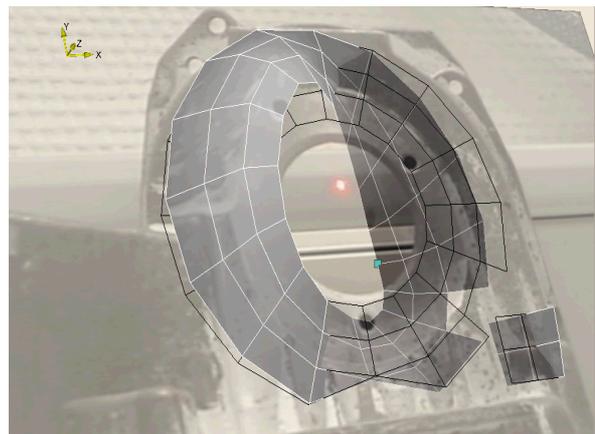
**Abb. 12: Gemitteltes Geschwindigkeitsspektrum der ersten Messung auf einer über einen Lautsprecher angeregten Getriebeglocke.**

Die durch die Scanningmessung ermittelten Schwingformen bei 7500 Hz für 30° und 150° Phase sind in Abbildung 13 dargestellt. Diese Ergebnisse wurden zusammen mit dem ITO auf der Konferenz „Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques“ 2010 publiziert [17].

a)

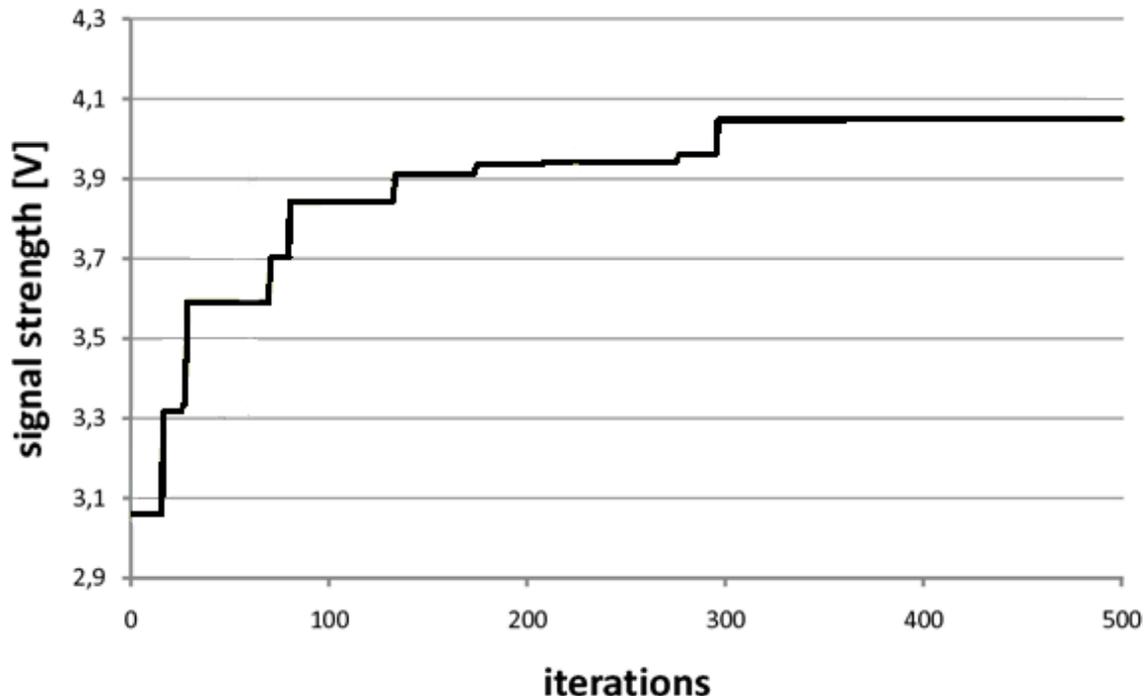


b)



**Abb. 13: Schwingformen (7500 Hz) bei einer Phase von 30° a) sowie einer Phase von 150° b), welche mit Funktionsmuster 1 gemessen worden ist.**

Die Schnittstelle zur Beeinflussung der Hologramme für die Speckle-Optimierung wurde im Berichtszeitraum mit der Universität Wuppertal vereinbart. Da die vom im Funktionsmuster 1 eingebauten IVS-Vibrometer Signalpegelspannung über die NI-Datenerfassung im Funktionsmuster 1 über Software abgefragt werden kann, hatte die Universität Wuppertal eine Zugriffsmöglichkeit auf den Signalpegel. Außerdem wurde von vornherein mit dem ITO vereinbart, dass über die DLL vom ITO Zernike-Koeffizienten übergeben werden können, mit denen dann die vom SLM eingebrachten Wellenfrontaberrationen berechnet werden. Somit stand der Universität Wuppertal die Hardware und die Software-Schnittstelle zur Verfügung, um erste Tests durchzuführen. Dafür wurde zuerst die Latenzzeit zwischen Übergabe der Zernike-Koeffizienten und der Änderung des Signalpegels untersucht.



**Abb. 14: Steigerung der Signalstärke um 1 V entspricht einer Vervielfachung der detektierten Signalleistung, welche ein Maß der Signalqualität ist.**

Die ermittelte Latenzzeit von 86 ms muss berücksichtigt werden, damit sichergestellt ist, dass wirklich der Signalpegel gemessen wird, der durch die aktuellen übergebenen Aberrationen verursacht wird. Ein typischer Optimierungsdurchlauf wird in Abbildung 14 gezeigt. Die Ergebnisse wurden als gemeinsame Beiträge von der Universität Wuppertal auf der „American Control Conference“ 2011 [18] und auf der Konferenz „Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques“ 2012 vorgestellt [19].

- [17] S. Zwick, M. Warber, T. Haist, F. Schaal, W. Osten, S. Boedecker, C. Rembe, „Advanced Scanning Laser-Doppler Vibrometer with Computer Generated Holograms“, 9th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques and Short Course, AIP 978-0-7354-0802-9/10, (2010).
- [18] S. Mayer, B. Tibken, „C. Rembe, A new Approach for Signal Loss Compensation in a Vibrometer“, IEEE American Control Conference, San Francisco, USA, June 29 - July 1, (2011).
- [19] S. Mayer, B. Tibken, and C. Rembe, „Advanced techniques in vibrometry by using spatial light modulators“, AIP Conf. Proc. 1457, 14 (2012).

## **II.1.2 Funktionsmuster 2a und 2b – Multipoint-Vibrometer**

### **II.1.2.1 Geplante Projektergebnisse**

Im Arbeitspaket 1.2 sollten die aus dem Arbeitspaket 1.1 gewonnen Erkenntnisse für die Realisierung eines Multipoint-Vibrometers genutzt werden. Dies beinhaltet neben der optischen und mechanischen Konstruktion, vor allem auch eine Erarbeitung einer geeigneten Mehrkanal-Demodulatorelektronik und einer dazu passenden Ansteuerungssoftware. Diese wurde wieder so entworfen, dass sie in die PSV-Software eingebunden werden konnte. Es wurden wieder insgesamt zwei Funktionsmuster hergestellt, wobei sie sich grundlegend unterscheiden. Funktionsmuster 2a nutzte eine SLM zur Strahlaufteilung (14 Messpunkte) und Messpunktpositionierung, Funktionsmuster 2b nutzte hingegen in Glas geätzte

diffraktive optische Elemente (DOE) für die Strahlaufteilung (12 Messpunkte) und bewegliche Miniobjektive mit Faserzuleitung zur Messpunktpositionierung.

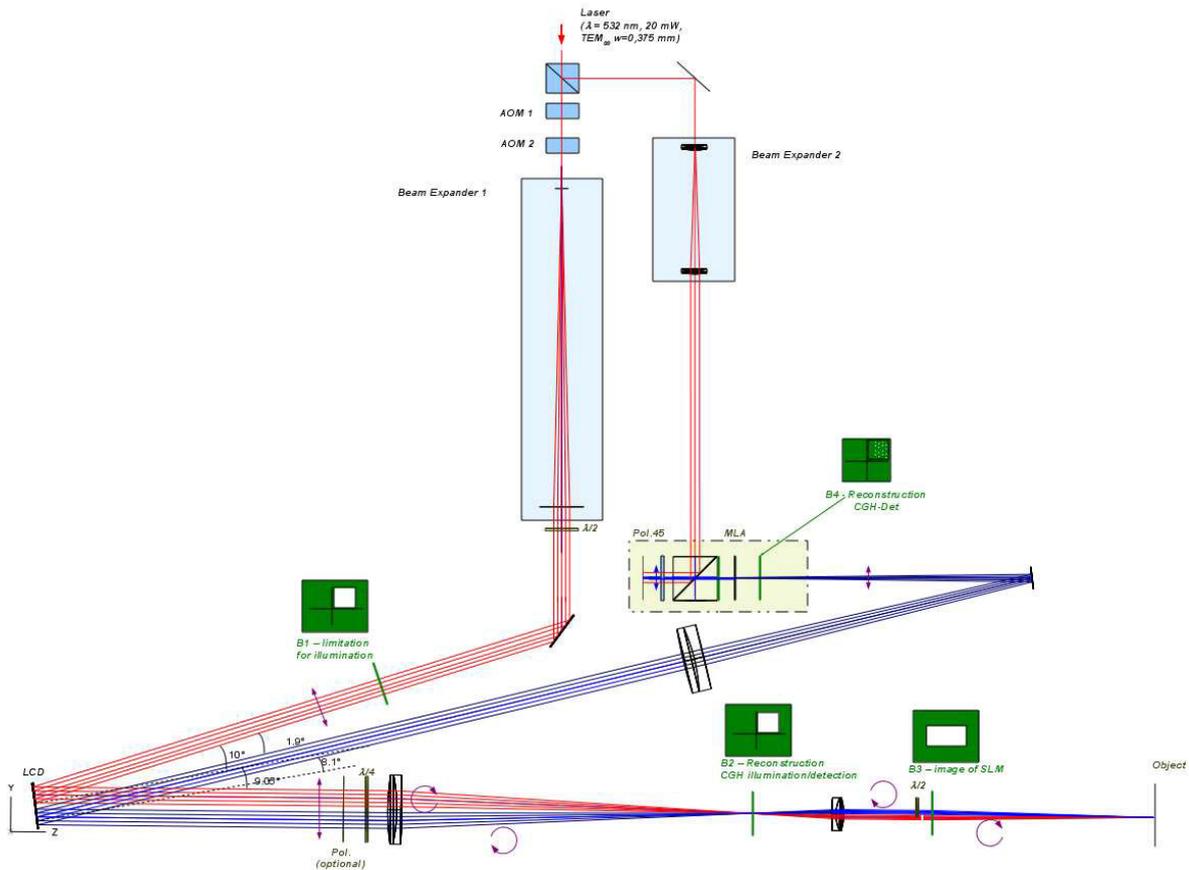
## II.1.2.2 Erreichte Projektergebnisse

### Realisierung des 1. Funktionsmusters für ein konfigurierbares Mehrstrahlvibrometer

Es wurde ein optischer Aufbau realisiert, der im Rahmen der Limitierungen durch die begrenzte Pixelanzahl der SLM ein optimales Verhalten der Technologie ermöglicht. Dadurch kann auf das verbesserte Verhalten geschlossen werden, welches durch ein SLM mit einer höheren Pixelanzahl erreicht werden würde. Ablenkwinkel kann mit einem Teleskop vergrößert werden, allerdings verringert sich dann die Anzahl  $n_B$  der beugungsbegrenzten Messpunkte im Winkelbereich. Es gilt  $n_B = (2s \tan\beta) / (\lambda/NA) \approx n_P / n_L$ ,  $s$  dem Arbeitsabstand, mit der Pixelanzahl des SLM  $n_P$  und der Anzahl von Pixel für einen  $2\pi$  Phasenänderung  $n_L$ . Nimmt man die absolute geringste mögliche Anzahl  $n_L = 2$  an, dann lassen sich bei 1000 Pixel 500 beugungsbegrenzte Punkte im Messfelddurchmesser erzeugen. Dann lässt sich aber keine vernünftige Winkelabstufung erreichen und die Beugungsverluste sind zu hoch. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass mindestens  $n_L = 4$  Pixel für eine  $2\pi$  Phasenänderung notwendig sind, um eine ausreichende Beugungseffizienz (81%) und ausreichende Winkelauflösung zu erhalten. Man erhält damit für 1000 Pixel etwa 250 beugungsbegrenzte Messpunkte auf dem Messfeld. In den Zielspezifikationen fordern die Anwender ein Messfeld von 25 cm x 25 cm bei 2 m Arbeitsabstand, wobei die Empfindlichkeit vorhandener Geräte des Polytec-Scanningvibrometers erhalten bleiben soll. Die Empfindlichkeit hängt im Wesentlichen von der NA ab und resultiert beim PSV mit einer Linse für den mittleren Arbeitsabstandsbereich in eine Messpunktgröße von etwa 0.25 mm bei 2 m Arbeitsabstand. Über das geforderte Messfeld hat man daher etwa 1000 beugungsbegrenzte Messpunkte zur Verfügung. Mit einem SLM mit 4.000 Pixeln pro Zeile und Spalte (also etwa 16 Mpixel) würden sich die Anforderungen der Anwender daher erreichen lassen. Da man diese Pixelanzahl für den Sendepfad benötigt, sind insgesamt 32 MPixel für die Phasen-SLM notwendig, um das gewünschte Verhalten zu ermöglichen. Es besteht die Hoffnung, dass SLM-Elemente mit deutlich höherer Auflösung als HDTV für zukünftiges 3D-Kino und für Beamer entwickelt werden, und sich dann diese Technologie für die Laser-Doppler-Vibrometrie eignet. Insgesamt kann zusammenfassend die Aussage getroffen werden, dass das Orts-Bandbreiteprodukt  $SBP$  existierender SLM im Moment noch zu gering ist.

$$SBP \approx \left( \frac{NA}{\lambda} D_{SLM} \sin \alpha_{Scan} \right)^2$$

$D_{SLM}$  ist der Durchmesser des SLM und  $\alpha_{Scan}$  der maximale Ablenkwinkel. Mit dem in Abbildung 15 gezeigten realisierten Aufbau wird ein Ablenkwinkel von etwa 4° bei 250 beugungsbegrenzten Punkten im Messfeld erreicht. Das Design der Optik des Mehrkanalvibrometers wurde vom Partner ITO in enger Zusammenarbeit mit Polytec durchgeführt. Die Konstruktion hat Polytec durchgeführt.



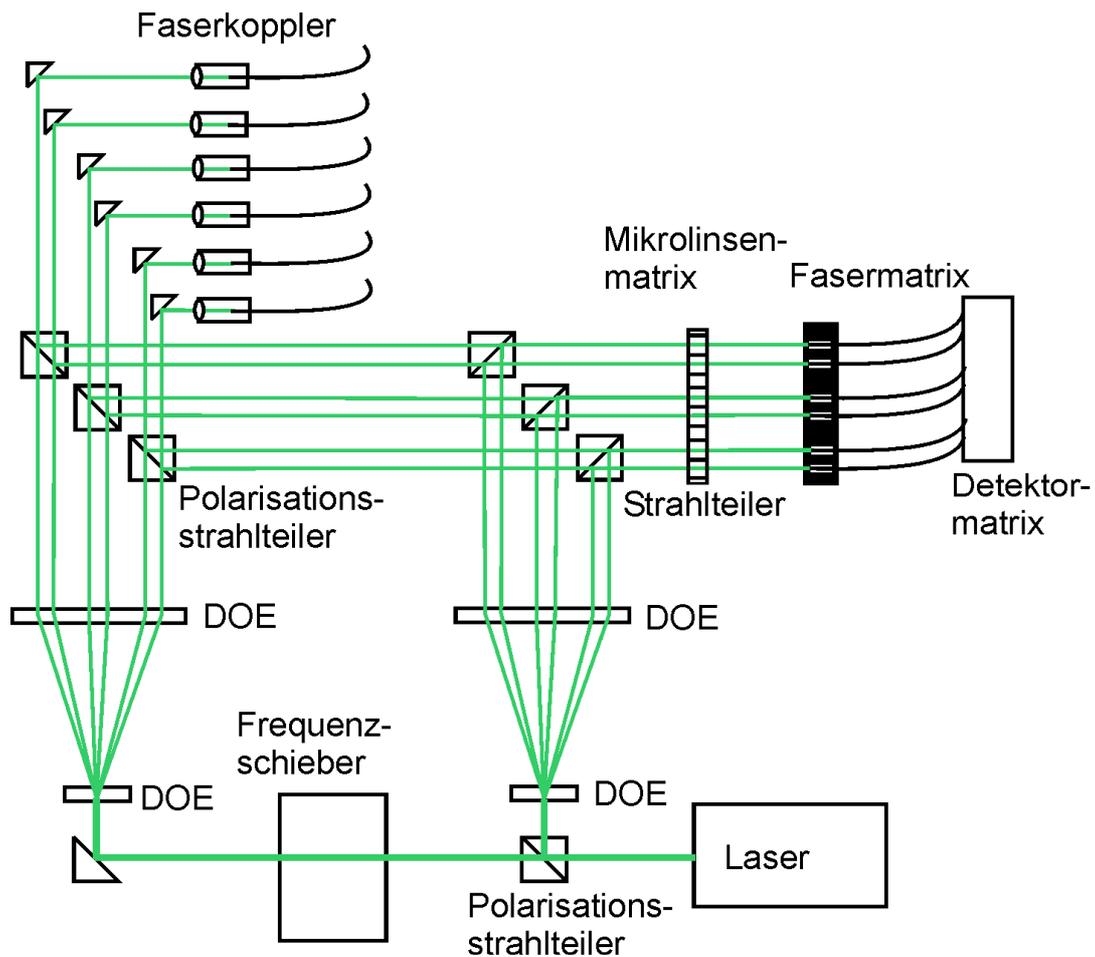
**Abb. 15: Endgültiger Aufbau des Mehrkanalvibrometers mit SLM-Element zur Strahlpositionierung.**

Mit dem aktuellen Aufbau konnte zwar nicht der Empfindlichkeit eines Standardvibrometers erreicht werden, aber die grundsätzliche Funktionsweise des Messprinzips konnte gezeigt werden. Die Optik wurde nach dem mechanischen Aufbau verkabelt und charakterisiert.

Eine sinnvolle Messung war auf Grund der geringen Empfindlichkeit bei mehr als drei Punkten gleichzeitig nicht möglich. Der Grund hierfür war die zu geringe Pixelanzahl der SLMs, wodurch der Ablenkwinkel zu gering ausfällt. Dies kann man durch ein Teleskop korrigieren, allerdings reduziert dies wiederum die Empfindlichkeit. Eine sinnvolle Realisierung eines Mehrkanalvibrometers mit SLM ist somit erst bei deutlich höherer Pixelzahl möglich. Ein entsprechendes SLM war zum Zeitpunkt des Projektes noch nicht erhältlich. Auf Grund dieser Tatsache wurde für das Funktionsmuster 2b ein anderes Konzept erarbeitet, welches im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

### Realisierung des 2. Funktionsmusters für ein konfigurierbares Mehrstrahlvibrometer

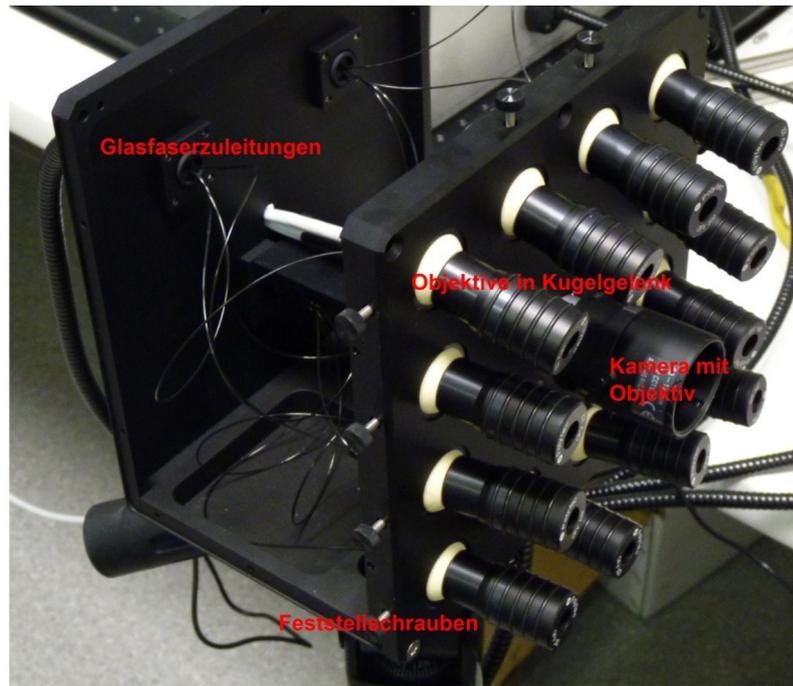
Beim Funktionsmuster 2b wurden keine SLMs mehr verwendet, stattdessen wurden in Glas geätzte diffraktive optische Elemente zur Strahlaufteilung verwendet. Da man mit DOEs lediglich eine Winkelablenkung erreichen kann, werden jeweils zwei DOEs hintereinander für den Referenz- und Messpfad verwendet. Das erste DOE teilt den eingehenden Strahl in 12 Strahlen auf, das zweite DOE lenkt die einzelnen Strahlen so um, dass sie wieder parallel zur optischen Achse verlaufen, was den mechanischen und optischen Aufbau sehr vereinfacht. Die optische Lösung für das Mehrkanalvibrometer ist in der schematischen Darstellung in Abbildung 16 zu sehen.



**Abb. 16: Schematische Darstellung des Mehrkanalinterferometers von Funktionsmuster 2b**

Die so aufgeteilten Einzelstrahlen werden dann jeweils in Singlemode Fasern eingekoppelt und über Polytec-Objektive auf das Messobjekt fokussiert (Messabstand: wenige Zentimeter bis einige Meter). Die Objektive sind beweglich gelagert und können so per Hand auf den gewünschten Messpunkt gerichtet werden. Der Messkopf (ohne Abdeckung) kann in Abbildung 17 gesehen werden. Auf diese Weise wurde ein Mehrstrahlvibrometer mit 12 Messpunkten realisiert, welches eine ausreichende Empfindlichkeit für alle gängigen Messaufgaben erreichte.

Dieses Funktionsmuster wurde an die Anwender übergeben und ermöglichte die Messungen von instationären Vorgängen, welche mit einem scannenden Vibrometer nicht gemessen werden können.



**Abb. 17: Messkopf des Funktionsmusters 2b**

#### Realisierung der Demodulatorelektronik

Grundsätzlich ist es möglich die Detektorsignale mit mehreren diskreten analogen Schaltungen zu demodulieren. Jedoch ist es bei einem mehrkanaligen System sehr schwierig aufgrund der Toleranzen der elektronischen Bauteile die Phasensynchronität gewährleisten zu können. Darüber hinaus besteht eine diskrete analoge Demodulatorschaltung aus mehreren Bauteilen, was die Realisierung für ein Mehrkanalsystem sehr aufwendig und kostenintensiv machen würde.

Im Rahmen des Projektes wurde die Realisierung des Demodulators auf digitaler Basis angestrebt. Das Konzept beruht auf einem mehrkanaligem A/D-Wandler System, welches die Signale der einzelnen Detektorkanäle phasensynchron einliest. Die Synchronisierung wird dabei durch einen gemeinsamen Taktgeber (Master Oszillator), der alle A/D-Wandler steuert gewährleistet. Der digitale Datenstrom der einzelnen Detektorkanäle wird dann einem FPGA (Field Programmable Gate Array) zugeführt, dessen logische Schaltung die Demodulation übernimmt und die Signale für die Weiterverarbeitung aufbereitet. Bei einem mehrkanaligen System muss die Auswertung unbedingt phasensynchron erfolgen, damit das Ergebnis bei flächenhaften Messungen nicht verfälscht wird. Die demodulierten Signale werden schließlich von einer weiteren Schaltung per Ethernet oder USB zur Auswertung an einen PC übertragen. Abbildung 18 zeigt ein Blockschaltbild des realisierten Demodulatorelektronik-Konzepts. Der digitale Ansatz hat weiterhin den Vorteil, innerhalb gewisser Grenzen problemlos in der Kanalzahl skalierbar zu sein. Der Signalverarbeitungs- und Ansteuerungs-Elektronik-Box wurde mit folgenden Komponenten aufgebaut:

- Zentraler Clock-Generator zur Synchronisierung
- Detektorsignale werden als Analogsignal einem mehrkanaligen A/D Wandler zugeführt, der synchron angesteuert wird
- Demodulation der einzelnen Signale nach der ArcTan Methode im FPGA
- Verwendung der Evaluierungsboards für den A/D-Umsetzer von Analog Devices mit Xilinx-FPGA. Datenstrom der demodulierten Signale an Daten-Interface und Anbindung an Auswerte-Rechner per USB => Begrenzung der Bandbreite auf 10 kHz bei einer Messzeit von 410 ms.



zusammen mit dem ITO auf mehreren Fachkonferenzen vorgestellt. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 19 zu sehen.



**Abb. 19: Foto vom Funktionsmuster 2b, welches auch bei den Anwendern im Projekt für zahlreiche Messaufgaben eingesetzt wurde.**

- [20] F. Schaal, M. Warber, C. Rembe, T. Haist, W. Osten, „Dynamic multipoint vibrometry using spatial light modulators“, Int. Workshop Fringe 2009, Nürtingen, Germany, 14.-16. September, 2009
- [21] T. Haist, M. Warber, W. Osten, A. Tarbeyevskaya, C. Rembe, M. Ludwig, W. Stork, „SLM-Based Multipoint Vibrometry“, Proc. SPIE 8082, 80821V (2011).
- [22] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, F. Ritter, C. Rembe, „Advanced Multipoint Vibrometry using Spatial Light Modulators“, AIP Conf. Proc. 1457, 234 (2012).
- [22] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, C. Rembe, “SLM-based Multipoint Vibrometry“, Devices and Systems for Laser-based Sensors (SM2F), 25 June, Monterey, California, 2012
- [23] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, C. Rembe, “A 14-channel multipoint vibrometry system using dynamic Holography“, Interferometry XVI: Applications, 12 August, San Diego, California, 2012

## **II.2. Die wichtigsten Positionen des Zahlungsmäßigen Nachweises**

Die wichtigsten Positionen des Zahlungsmäßigen Nachweises sind die Arbeitsstunden, die für die Erarbeitung der Funktionsmuster aufgewendet worden. Auf Grund der positiven Ergebnisse im Projekt und auf Grund der sich abzeichnenden Produktmöglichkeiten wurde ein deutlich höherer Aufwand als geplant investiert. Für das ursprüngliche Projekt waren Personalkosten von 588.200,- € geplant. Für die Verlängerung waren zusätzliche 125.580,- € vorgesehen, so dass sich eine geplante Gesamtaufwendung für Personalkosten von

713.780,- € ergibt. Insgesamt wurden bis zum Abschluss 783.770,54 € an Personalkosten aufgebracht, um das Projekt bewältigen zu können. Somit hat Polytec über 69.000,- € mehr als bewilligt für Personalaufwendungen ausgegeben. Durch die von Polytec zusätzlich geleistete Arbeit und durch die bewilligte Verlängerung konnten die erwartenden Resultate voll und ganz erfüllt werden.

Die geplanten Materialkosten bewegen sich im geplanten Rahmen und wurden sogar knapp unterschritten, obwohl noch ein zweites komplett neues Konzept für das Mehrkanalvibrometer entwickelt worden ist. Die gesamten Materialkosten belaufen sich auf 140.524,93 €. Gegenüber den geplanten Kosten von 144.500,- € bedeutet dies, dass etwa 4.000,- € weniger für Material als geplant ausgegeben worden sind.

Die getätigten FE-Fremdleistungen liegen deutlich unter der geplanten Summe, da der geplante Unterauftrag in der Verlängerung von der Universität Wuppertal nicht angeboten werden konnte. Daher konnten nur die Unteraufträge für die in der ursprünglichen Laufzeit geplanten Teilprojekte in Wuppertal beauftragt werden. Somit hat Polytec anstatt der geplanten 95.140,- € für FE-Fremdleistungen nur 80.000,- € ausgegeben. Die geplanten Arbeiten wurden von der Universität Wuppertal aber trotzdem mit Eigenmitteln durchgeführt, so dass das Projektziel trotzdem in vollem Umfang erreicht werden konnte.

Die Reisekosten liegen mit 8.900,- € etwa 1500,- € unter dem geplanten Rahmen, obwohl sehr aktiv auf verschiedenen Konferenzen vorgetragen wurde. Der Grund liegt darin, dass der letzte Konferenzbesuch nach der Projektlaufzeit stattfindet und nicht mehr abgerechnet werden konnte.

Die vorhabenspezifischen Abschreibungen liegen mit 7.316,- € knapp über den geplanten Kosten von 6.500,- €. Insgesamt betragen die Projektkosten für Holovib bei Polytec mit 1.020.471,13 € über den geplanten 970.320,- €.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die in diesem Bericht erläuterten Ergebnisse wären ohne das Holovib-Kooperationsprojekt für Polytec unerreichbar gewesen. Die Möglichkeit Messlaserstrahlen zu positionieren und zu fokussieren ist für Polytec von hoher Bedeutung. Daher ist es für Polytec sehr wichtig Technologien wie Räumliche Lichtmodulatoren und Computer Generierte Hologramme zu kennen. Allerdings war der Risikofaktor sehr hoch und für eine Firma der Größe von Polytec ist es sehr schwierig eine über drei Jahre währende Forschung zu finanzieren, um so ein Thema mit ungewissen Ausgang zu finanzieren. Wie es sich gezeigt hat, hat das Holovib-Projekt hier tatsächlich ein negatives Ergebnis gebracht, denn mit den kommerziell erhältlichen Modulatoren können die Anforderungen der Anwender bzw. Kunden noch nicht erreicht werden. Dies demonstriert das hohe technische Risiko und den hohen wissenschaftlichen Anspruch des Projekts und die Notwendigkeit und Angemessenheit einer Förderung. Den hohen wissenschaftlichen Gehalt zeigen die vielen Publikationen, die aus dem Projekt resultiert sind.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Trotz des hohen technischen Risikos bei den Räumlichen Lichtmodulatoren war das Projekt so ausgelegt, dass auch bei einem negativen Ergebnis zu den Lichtmodulatoren in einer absehbaren Zeit nachdem Projekt wirtschaftlicher Nutzen aus den Ergebnissen gezogen werden kann. Dazu sind insbesondere die Resultate aus der Verlängerung wichtig. Polytec hat sich während des Projekts die Technologie für eine parallele, komplett digitale Demodulation von mehreren Kanälen erarbeitet. Die Technologie ist dabei noch skalierbar ausgelegt, so dass eine beliebige Anzahl von Kanälen in einem Messkopf oder auf mehrere

Messköpfe verwendet werden können. Die Lösung ist unabhängig vom Messkopf und daher geeignet für jede optische Lösung. Aus diesem Grund konnte Polytec auch den alternativen Messkopf in der Verlängerung realisieren und für die Evaluierung des Demodulatorkonzepts verwenden. Ebenfalls die Softwareeinbindung ist flexibel gestaltet, so dass man Messpunkte in der Software dem Messgitter frei zuordnen kann, ohne dass die genaue Realisierung des Messkopfes ausschlaggebend wäre. Daher könnte man sogar mehrere Einpunktköpfe für eine Mehrkanalmessung verwenden. Aus diesem Grund hat Polytec nicht nur die technologischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Räumlichen Lichtmodulatoren evaluiert, sondern auch die technologischen Grundlagen für die Mehrkanalvibrometrie geschaffen und sich dazu die Anforderungen der Anwender eingeholt. Auf dieser Basis ist es für Polytec möglich innerhalb von einem Jahr eine endgültige Festlegung der zu verwendenden Technologien durchzuführen und 2014 mit einer Produktentwicklung zu starten. Die Projektabschlussveranstaltung wurde am 16. April 2013 auf einem Anwender-Workshop zu einem Mehrkanalvibrometer durchgeführt. Das dort ausgestellte komplette Mehrkanalvibrometer ist in Abbildung 19 zu sehen. Die wesentlichen Anforderungen an ein Produkt und die einzusetzenden Technologien sind für Polytec nun offensichtlich.

## **II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es gibt keine bekannten Resultate von Dritten, welche die Verwertung der in HoloVib erarbeiteten Ergebnisse in Frage stellen. Die Diskussion aus dem Antrag hat noch Gültigkeit.

## **II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

- [17] S. Zwick, M. Warber, T. Haist, F. Schaal, W. Osten, S. Boedecker, C. Rembe, „Advanced Scanning Laser-Doppler Vibrometer with Computer Generated Holograms“, 9th Int. Conf. on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques and Short Course, AIP 978-0-7354-0802-9/10, (2010).
- [18] S. Mayer, B. Tibken, C. Rembe, „A new Approach for Signal Loss Compensation in a Vibrometer“, IEEE American Control Conference, San Francisco, USA, June 29 - July 1, (2011).
- [19] S. Mayer, B. Tibken, and C. Rembe, „Advanced techniques in vibrometry by using spatial light modulators“, AIP Conf. Proc. 1457, 14 (2012).
- [20] F. Schaal, M. Warber, C. Rembe, T. Haist, W. Osten, „Dynamic multipoint vibrometry using spatial light modulators“, Int. Workshop Fringe 2009, Nürtingen, Germany, 14.-16. September, (2009).
- [21] T. Haist, M. Warber, W. Osten, A. Tarbeyevskaya, C. Rembe, M. Ludwig, W. Stork, „SLM-Based Multipoint Vibrometry“, Proc. SPIE 8082, 80821V (2011).
- [22] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, F. Ritter, C. Rembe, „Advanced Multipoint Vibrometry using Spatial Light Modulators“, AIP Conf. Proc. 1457, 234 (2012).
- [22] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, C. Rembe, „SLM-based Multipoint Vibrometry“, Devices and Systems for Laser-based Sensors (SM2F), 25 June, Monterey, California, (2012).
- [23] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, C. Rembe, „A 14-channel multipoint vibrometry system using dynamic Holography“, Interferometry XVI: Applications, 12 August, San Diego, California, (2012).
- [24] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, K. Bendel, M. Giesen, M. Gartner, C. Rembe, „Characterization And Demonstration of a 12-Channel Laser-Doppler Vibrometer“, accepted at the Int. SPIE conference Optical Metrology, Munich, Germany, 13-16 May, 2013.
- [25] T. Haist, C. Lingel, W. Osten, M. Winter, M. Giesen, F. Ritter, C. Rembe, K. Bendel, „Holographic Multipoint Vibrometry“, to be submitted at Review of Scientific Instruments, 2013.