



Universität Stuttgart

50 JAHRE ITO  
50 Jahre ITO  
Institut für Technische Optik  
der Universität Stuttgart





Liebe Freunde und Mitglieder  
des Instituts für Technische Optik,

das Institut für Technische Optik begeht in diesem Jahr seinen 50. Geburtstag. Gemessen an der Geschichte der Optik erscheinen 50 Jahre als ein vergleichsweise kurzer Zeitraum. Führt man sich jedoch vor Augen,

welche Entwicklung diese Disziplin gerade in den vergangenen 50 Jahren genommen hat, dann wird schnell offensichtlich, dass es eine Zeit der großartigsten Veränderungen in der Optik war. Alle heutigen und ehemaligen Mitglieder des ITO sind stolz, dass sie an dieser Entwicklung teilhaben konnten.

Solch ein Jubiläum ist ein willkommener Anlass, um sowohl Rückschau zu halten als auch einen Ausblick zu wagen. Diesem Anliegen widmet sich die vorliegende Festschrift. Wichtige Abschnitte der 50jährigen Geschichte des Instituts sollen beleuchtet und die jeweils herausragenden Forschungsleistungen mit den dafür verantwortlichen Personen in Verbindung gebracht werden. Unser Grundprinzip „Kontinuität und Erneuerung“, dem sich alle Mitglieder des Instituts verpflichtet fühlen, wird in einer Schilderung der aktuellen Forschungsschwerpunkte des Instituts deutlich werden. Dabei sind wir bemüht, jenes hohe Maß an Faszination, das von der Optik ausgeht und das die Akteure des Instituts immer wieder in ihren Bann zieht, möglichst nahtlos an den Leser weiterzugeben.

Besondere Beachtung erfährt in diesem Zusammenhang die Widmung des Instituts, die ihre zentrale Bestimmung in der engen Verzahnung von physikalisch motivierter Grundlagenforschung mit der auf volkswirtschaftlichen Gewinn ausgerichteten ingenieurtechnischen Implementierung findet. Eingebettet in den Maschinenbau der Universität Stuttgart, aber in enger

Verbindung vor allem mit der Physik und der Elektrotechnik, hat das ITO seine Position an der Schnittstelle zur industriellen Praxis bisher ausgefüllt und wird diese auch zukünftig prominent einnehmen. Davon zeugen insbesondere jene einschlägigen Ergebnisse, die in mehreren Sonderforschungsbereichen sowie zahlreichen DFG-Schwerpunktprogrammen und BMBF- sowie EU-Verbundprojekten erzielt wurden. Aktuell ist das ITO als „Principal Investigator“ in beide Vorhaben eingebunden, die der Universität Stuttgart in der ersten Runde der DFG-Exzellenzinitiative bewilligt wurden: im Exzellenzcluster „Simulation Technology“ (SimTech) und in der Graduiertenschule „Graduate School for Advanced Manufacturing Engineering“ (GSAME). Unser Anspruch, die internationale Spitzenforschung im Bereich der Technischen Optik kontinuierlich mit zu gestalten, erfährt durch die Einbettung in strategische Forschungsvorhaben der Universität eine wichtige Förderung.

An einem solchen Tag gilt es jedoch vor allem jenen Dank zu sagen, die mit ihrer Unterstützung die positive Entwicklung des ITO nachhaltig mitgeprägt haben. Dazu zählen unsere Partner in den verschiedenen Projektträgerschaften, angefangen bei der DFG, über den VDI, die AiF und die EU, das Land Baden-Württemberg und hier vornehmlich die Baden-Württemberg Stiftung sowie unsere zahlreichen nationalen und internationalen Kooperationspartner in unterschiedlichen Industriezweigen. Ohne die kontinuierliche Förderung durch unsere Drittmittelgeber und den intensiven Dialog mit der Industrie wäre die Tätigkeit des ITO im Sinne seiner Widmung nicht möglich gewesen. Weitere Kooperationsmöglichkeiten erschließt sich das Institut über neue strategische Allianzen, die durch das Stuttgart Research Center of Photonic Engineering SCoPE getragen werden. Als ein Kind der neuen Forschungsstrategie und mit Unterstützung der Universität Stuttgart wurde

das Forschungszentrum 2009 von 3 Fakultäten unter maßgeblicher Beteiligung des ITO gegründet. Erste interdisziplinäre Projekte sind hier bereits auf dem Weg.

Um als verlässlicher Kooperationspartner auch weiterhin begriffen zu werden, werden wir neben der forschenden Exzellenz die lehrende Exzellenz zielstrebig ausbauen. In den zurückliegenden 5 Jahrzehnten haben zahlreiche Absolventen des ITO den ausgezeichneten Ruf des Instituts nicht nur national, sondern vor allem auch international in die verschiedensten Branchen getragen. Die stolze Zahl von 66 erfolgreichen Dissertationen sowie 500 Studien- und Diplomarbeiten legt hierfür ein schönes Zeugnis ab. Der neue Master-Studiengang „Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik“ wird die Sichtbarkeit des Lehrgebietes im Maschinenbau deutlich verbessern und günstigere Voraussetzungen schaffen, um den Nachwuchs noch gezielter auf die Bedürfnisse der Industrie auszurichten. Mit dem im Wintersemester 2010/2011 startenden Studiengang „Medizintechnik“ und der darin eingebetteten Stiftungsprofessur „Optik-Design und Simulation“ erschließt sich das ITO neue Anwendungsgebiete und wird künftig noch besser in der Lage sein, auf strategischen Feldern, wie der Nanotechnologie, forschend und lehrend tätig zu sein.

In diesem Sinne wünsche ich allen Freunden und Mitgliedern des ITO eine mit neuen Erkenntnissen und interessanten Gesprächen bereicherte Festveranstaltung und insbesondere dem ITO weitere gute Jahre für die Forschung und Lehre auf dem spannenden Feld der Technischen Optik.

Stuttgart im September 2010



Prof. Dr. Wolfgang Osten  
Leiter des Instituts für Technische Optik



## Grußworte

### **Herzlichen Glückwunsch zu 50 Jahren ITO!**

50 Jahre Optik und Feinwerktechnik in höchster Qualität – ganz im Sinne der Gründerväter eingebunden in den traditionsreichen Maschinenbau in Baden-Württemberg.

Schon im Jahre 1949 wurde die Hauptaufgabe des Lehrstuhls benannt: Die angehenden Fertigungsingenieure und Physiker sollten mit den optischen Messverfahren vertraut gemacht und dazu befähigt werden, selbständig durch Forschungsarbeiten neue Messverfahren zu entwickeln und neue Geräte zu bauen.

Drei Generationen von Hochschullehrern und Institutsdirektoren haben das ITO in dieser Tradition geprägt. Drei Generationen exzellent ausgebildeter Wissenschaftler und Ingenieure sind als Absolventen des ITO in der Lehre, der Wissenschaft und in der Wirtschaft an verantwortungsvollen Stellen tätig und tätig gewesen, eine Wertschöpfung, die für Baden-Württemberg und Deutschland nicht hoch genug eingeschätzt werden kann.

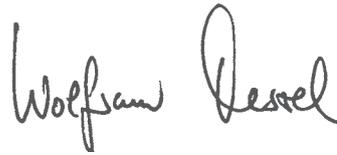
Das ITO ist ein wichtiger Bestandteil der Forschung und Wirtschaft geworden. Es pflegt mit Partnerinstitutionen im In- und Ausland sowie mit internationalen Organisationen vielfältige Kooperationen, und ist im Umfeld der Universität Stuttgart an einem der leistungsstärksten Technologiestandorte Europas angesiedelt.

Vor 50 Jahren zeigte der amerikanische Physiker Theodore Maiman die Funktion des ersten Lasers. Danach begann der Siegeszug der Lasertechnologie in Technik und Forschung, auch im ITO. Der Laser brachte einen Quantensprung in die vielen Forschungsprojekte und Ergebnisse der technischen Optik und optischen Messtechnik, die dankenswerter Weise sowohl vom Bundesministerium für Bildung und Forschung als auch von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen und dem Land Baden-Württemberg gefördert wurden. Weitere Anwendungen im Bereich Life Science kamen dazu.

In fünf Sonderforschungsbereichen der DFG wurden verschiedenste innovative Methoden der optischen Messtechnik, Medizintechnik und Photonik erarbeitet und die Ergebnisse in die Wirtschaft und Medizin umgesetzt. Sie haben damit maßgeblich zur Profilbildung der Universität Stuttgart beigetragen. Aktuell ist das ITO in beiden Exzellenz-Vorhaben, die der Universität Stuttgart in der ersten Runde der DFG-Exzellenzinitiative bewilligt wurden, aktiv eingebunden: im Exzellenzcluster „Simulation Technology“ (SimTech) und in der Graduiertenschule „Graduate School for Advanced Manufacturing Engineering“ (GSaME). Das ITO zählt somit zu den wenigen Instituten der Universität, die in beiden Vorhaben als sogenannte „Principal Investigator“ vertreten sind. Damit unterstreicht und beweist das Institut weiterhin seinen kontinuierlichen Anspruch, internationale Spitzenforschung im Bereich der Technischen Optik voranzutreiben.

Auch der wissenschaftliche Nachwuchs profitierte in besonderer Weise von dieser fachlichen und räumlichen Vernetzung durch gemeinsame Seminare und Kolloquien. Sie wirkten als clusterartig angelegte Kompetenzfelder über mehrere Fakultäten hinweg in die Zukunft und bereiteten Forschungsverbünde wie das interfakultative Stuttgart Research Center of Photonic Engineering (ScoPE) vor, das – gleichfalls in der Tradition stehend – weit über die Universität Stuttgart hinaus wirkt und Verbindungen zur Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie aufbaut. Mit dieser Perspektive wird sich auch die Lehre den zukünftigen Anforderungen anpassen. Hierzu wird noch im Wintersemester 2010 der Stiftungslehrstuhl „Optik-Design und Simulation“ eingerichtet und durch die neue Stiftungsprofessur seine Arbeit beginnen.

Ich sehe die Universität Stuttgart in den nächsten zehn Jahren unter den Top Ten der deutschen Forschungsuniversitäten mit einer breiten internationalen Wahrnehmung, Akzeptanz und Anerkennung ihrer Lehr- und Forschungsleistungen. Das ITO wird wie in der Vergangenheit seinen Beitrag dazu leisten. Nochmals herzlichen Glückwunsch zum 50. Geburtstag und alles Gute für die nächsten 50 Jahre!



Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel  
Rektor Universität Stuttgart



Uni-Campus Vaihingen



Seit seiner Gründung im Jahre 1960 setzt das Institut für Technische Optik (ITO) der Universität Stuttgart Maßstäbe in der technischen Optik und der optischen Messtechnik. Das Kürzel „ITO“ ist ein anerkanntes Markenzeichen für technologische und wissenschaftliche Exzellenz in der Optik.

Die Mitarbeiter des ITO spüren stets frühzeitig das Potenzial neuer Technologien auf, treiben die Entwicklungen mit voran, um aus Innovationen industrierelevante optische Applikationen zu schaffen.

So lernten Generationen von Physikern und Ingenieuren ihr Handwerk mit einem optischen Baukasten, der beim ITO entwickelt wurde und noch heute industriell und wissenschaftlich sehr erfolgreich eingesetzt wird.

Das ITO verdankt seine hohe internationale Reputation einer Vielzahl von maßgeblichen Errungenschaften.

In diesen Tagen feiert die Branche den 50. Geburtstag des Lasers. Frühzeitig erkannten die Mitarbeiter des ITO dessen vielfältige, revolutionäre Einsatzmöglichkeiten in der optischen Messtechnik und legten entscheidende Grundsteine in der optischen Informationsverarbeitung und Oberflächenmesstechnik. Aber auch die visionäre Kombination von optischen Verfahren mit digitaler Bildaufnahme und -auswertungen prägen heute maßgebliche Entwicklungen in der Interferenz- und Konfokalmikroskopie.

Die kontinuierliche Beteiligung an maßgeblichen wissenschaftlichen Debatten und die Nähe zu industrienahe Entwicklungen tragen nicht zuletzt dazu bei, dass die Absolventen des ITO eine exzellente Ausbildung vorweisen können. Hier besteht seit langer Zeit eine enge Verbindung zu der Firma Carl Zeiss: Absolventen des ITO bekleiden heute bei Carl Zeiss verantwortungsvolle Leitungspositionen und setzen mit ihrer Arbeit entscheidende technologische Akzente.

Wir wünschen dem ITO, dass es seinen erfolgreichen Weg fortsetzt – und damit weiterhin wichtige Beiträge zu einer prosperierenden und innovativen optischen Industrie leistet.

In diesem Sinne gratulieren wir dem ITO sehr herzlich zum 50jährigen Bestehen und wünschen für die Zukunft alles Gute.

Dr. Markus Weber  
Senior Vice President  
Corporate Research and Technology  
Zeiss AG



Prof. Dr. Wolfgang Osten,

I would like to congratulate you, your current colleagues, and your former colleagues at ITO for ITO reaching its 50th birthday. It is hard for me to believe that ITO is 50 years old, but we both know that time passes quickly. I have been acquainted with ITO since about 1978 when my good friend Hans Tiziani went to ITO.

ITO has a great international reputation for its excellent research in surface metrology, active optics, aspheric lens measurement, diffractive optics, and non-destructive testing. Since these are the same areas I have worked in for many years, I have learned a lot from the research performed at ITO, and while ITO is a competitor, it has always been a very friendly competition.

One thing I have always been impressed with is the close relationship ITO has with industry. Because of this close cooperation ITO has always worked on real life problems, and I think this is really important. I have always known that the talks and papers from ITO always discuss important problems and I should study them carefully.

I am sorry I am not able to be with you on September 10 when you celebrate ITO's 50 birthday, but my thoughts will be with you that day.

Yours truly,

James C. Wyant  
Dean, College of Optical Sciences  
Professor of Optical Sciences  
OSA President, 2010



Dear Prof.  
Dr. Wolfgang Osten:

It is my great pleasure and honor to send this message of congratulations on the occasion of Golden Jubilee of Institut für Technische Optik (ITO).

I congratulate you and Prof. Hans Tiziani on the glorious record of the institute and the fact that ITO has been recognized as a leading international research institute renowned for its unique and unparalleled strength in Technischer Optik.

It is quite fortunate that the field of research in my group is close to that of ITO, and this has given us various opportunities of mutual visits and stays for cooperative research, which turned out to be very successful, particularly for young scientists to get acquainted with each other.

Because of its high activity and many innovative research papers from ITO, the visibility of ITO is very high even seen far from Asia. Near the summit of Mt. Fuji there are two big stones nicknamed as Osten Stone

and Tiziani Stone for the record of their visit to Mt. Fuji at the occasions of conferences. These stones symbolize our friendship and also demonstrate the strong presence of ITO in Japan, sitting near the highest position of the land.

I regret and apologize that I shall not be able to join you to celebrate in Stuttgart, but my thoughts will be with you.

Yours sincerely,

Mitsuo Takeda  
Professor of Optoelectronics  
President of the Optical Society of Japan,  
An affiliate of the Japan Society of Applied Physics



# 50 JAHRE ITO





*Das ITO-Team*

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	04
<b>Grußworte</b> .....	06
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	13
<b>1 Die Gründungsphase 1947 – 1960</b> .....	14
<b>2 Das Fundament 1960 – 1978</b> .....	16
2.1 Aufbau des Instituts.....	16
2.2 Lehre.....	16
2.3 Forschung.....	17
2.4 Interimsleitung durch Prof. Glaser.....	17
<b>3 Ausbau und Erweiterung 1978 – 2002</b> .....	18
3.1 Neue konzeptionelle Ausrichtung und Erweiterung des ITO.....	18
3.2 Lehre.....	20
3.3 Forschung.....	22
3.4 Nationale Wirkung.....	25
3.5 Internationale Wirkung.....	26
3.6 Schlüsselübergabe.....	27
<b>4 ITO heute – ab 2002</b> .....	28
4.1 ITO-Struktur heute.....	28
4.2 Ausgewählte aktuelle Forschungs-Schwerpunkte.....	47
4.3 Lehre heute.....	72
4.4 Ausgewählte Veranstaltungen.....	76
25. Optik-Kolloquium – Programm.....	80
<b>5 50 Jahre ITO – Kompakt</b> .....	86
5.1 Mitarbeiter ab 1960.....	86
5.2 Dissertationen.....	88
5.3 Patente.....	92
5.4 Kolloquien.....	96

## 1

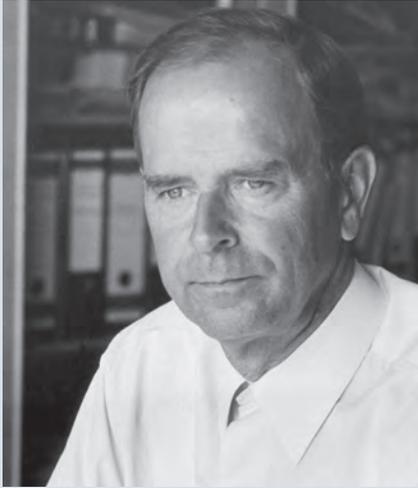
## Die Gründungsphase 1947–1960

Bereits 1947 war ein Lehrstuhl für Technische Optik an der damaligen Fakultät für das Maschinenwesen der Technischen Hochschule Stuttgart für Württemberg geplant. Im Jahre 1949 wurde die Hauptaufgabe des Lehrstuhls benannt: die angehenden Fertigungsingenieure und Physiker sollten mit den optischen Messverfahren vertraut gemacht werden und befähigt werden, selbständig durch Forschungsarbeiten neue Messverfahren zu entwickeln und neue Geräte zu bauen. Vorlesungen mit den Titeln „Geometrische Optik“, „Optische Instrumente“ und „Technische Messverfahren mit besonderen optischen Mitteln“ waren vorgeschlagen. Daneben sollten auch „Übungen an optischen Geräten“ abgehalten werden.

Es gab auch bereits Vorschläge für die Besetzung des Lehrstuhls aus dem Mitarbeiterkreis der Firmen Leitz in Wetzlar und Zeiss – Opton, Oberkochen. Jedoch vergingen noch 9 Jahre, bis der beantragte Lehrstuhl dann mit dem Haushalt 1956 bewilligt wurde. Nachdem bereits in zahlreichen Sitzungen der Berufungskommission Namen diskutiert und Gutachten eingeholt wurden, ging von der Abteilung Maschinenbau 1957 die Initiative aus, den Schwerpunkt des geplanten Lehrgebiets auf die optische Messtechnik, insbesondere für den Maschinenbau zu legen, um der inzwischen stark angewachsenen Zahl der Studierenden dieser Fakultät Rechnung zu tragen.

Die Berufungskommission berücksichtigte diese Zielstellung bei der Auswahl der für den Lehrstuhl vorgeschlagenen Persönlichkeiten. Sie sollten die Messtechnik der industriellen Fertigung aus eigener Erfahrung kennen und in der Lage sein, das Lehrgebiet über die optischen Messverfahren hinaus auch auf neue feinmechanische Verfahren zu erweitern.

Dr. Reinhart Schulze, wissenschaftlicher Mitarbeiter der Firma Ernst Leitz GmbH, Optische Werke Wetzlar wurde von Prof. Dr. Hermann Slevogt, TU Berlin empfohlen, dem er durch seine Vorträge im Berliner Maschinenbau-Kolloquium ebenso wie durch seine Veröffentlichungen aufgefallen war. Seine Entwicklung und seine Veröffentlichungen entsprachen besonders den Zielen, die die Fakultät dem neuen Lehrstuhl setzte. So übernahm Prof. Dr. phil. Reinhart Schulze am 01.02.1960 als Ordentlicher Professor die Einrichtung des Lehrstuhls Technische Optik und des Instituts für Technische Optik in der Fakultät für Maschinenwesen an der Technischen Hochschule Stuttgart, der heutigen Universität Stuttgart.



**Reinhard Schulze** wurde am 19.11.1911 in Gummersbach im Bergischen Land geboren. Er studierte Physik in Berlin, Kiel und Marburg. In Marburg promovierte er bei E. A. Grüneisen zum Dr. phil. mit einer Arbeit über die Schalldispersion in Chlor. Es folgte eine sehr produktive Tätigkeit bei der Osram-Studiengesellschaft in den Jahren 1938 bis 1940 und bei der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin von 1940 bis 1942. Von 1942 bis 1945 arbeitete er bei der Torpedo-Versuchsanstalt in Eckernförde. 1947 übernahm er in der Firma Ernst Leitz GmbH, Optische Werke in Wetzlar den Aufbau des Labors für optische Längenmessgeräte. Er war wesentlich beteiligt an der Entwicklung der optischen Feinmessgeräte der Firma Leitz, was seinen Niederschlag in einer großen Anzahl von Veröffentlichungen fand. 1967 fasste er in einem Artikel über Optische Messmethoden im Handbuch der Physik [1] Grundlagen, Vorteile und Anwendungsgebiete der optischen Messtechnik zusammen, die heute noch Aktualität haben.

Prof. Schulze übernahm am 01.02.1960 als Ordinlicher Professor den Lehrstuhl Technische Optik in der Fakultät für Maschinenwesen an der Technischen Hochschule Stuttgart, der heutigen Universität Stuttgart. Er wurde Leiter der Abteilung Maschinenbau der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Hochschule Stuttgart. Vom Sommersemester 1966 bis zum Wintersemester 1967/68 war er Dekan der Fakultät Fertigungstechnik der Universität Stuttgart. Von Mai 1970 bis Juni 1974 hatte Prof. Schulze das Amt des Vorsitzenden der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik inne. Er war Mitglied und Gutachter des gemeinsamen ad-hoc-Ausschusses des Bundesministeriums für Forschung und Technologie und der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur „Förderung der optischen Forschung und Technologie“. Prof. Schulze engagierte sich auch in der Studienstiftung des deutschen Volkes als federführender Vertrauensdozent und förderte junge Mitarbeiter.

Prof. Schulze verstarb unerwartet am 28.11.1976 im Alter von 65 Jahren und hinterließ ein Institut, das für den Maschinenbau in Baden-Württemberg eine neue Verbindung von Feinmechanik und Optik schaffen sollte.

*Foto: Klaus Leonhardt*

*[1] R. Schulze „Optische Messtechnik und Messverfahren“ in: Handbuch d. Physik, S. Flügge, Hrsg. Band 29 Springer-Verlag, Berlin (1967), S. 755 - 834.*

## 2

## Das Fundament 1960–1978

### 2.1 Aufbau des Instituts für Technische Optik

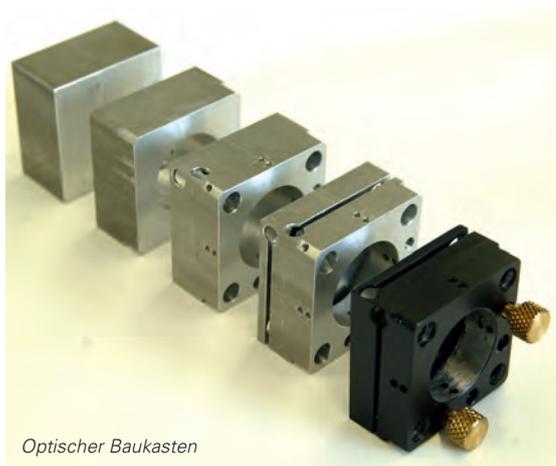
Am 01.02.1960 begann Prof. Schulze den Aufbau des Instituts für Technische Optik (ITO) mit einem Mitarbeiter in zwei leeren Räumen einer Baracke an der Huberstraße in Stuttgart. Im Sommer 1960 hatte Prof. Schulze drei Mitarbeiter, mit denen er in vier Räume des Gebäudes in der Keplerstraße 10 einzog: einen Assistenten, einen Mechaniker und eine Sekretärin. Im Frühjahr 1964 bekam das Institut, das jetzt fünf Mitarbeiter hatte, dreizehn Räume im Kollegiengebäude II in der Keplerstraße 17 zugesprochen (561 m<sup>2</sup>). Im Herbst 1976 hatte Prof. Schulze das Institut auf sechzehn Räume und 8 Mitarbeiter ausgebaut, die er aus dem Haushalt des Landes Baden-Württemberg, aus Forschungsaufträgen und von fördernden Institutionen bezahlte. Sie waren im Durchschnitt sieben Jahre am Institut tätig. Am Institut arbeiteten auch 3 Gastwissenschaftler. Im November 1976 besichtigte Prof. Schulze im Ingenieurwissenschaftlichen Zentrum in Stuttgart-Vaihingen, Pfaffenwaldring 9 die 27 neuen Institutsräume, die im Juni 1977 von den Baufirmen an das Institut für Technische Optik übergeben werden sollten. Hier wurden u.a. schwingungsdämpfende Fundamente für Versuchsaufbauten eingelassen.



Erste Unterkunft des ITO  
an der Huberstraße  
in Stuttgart  
Foto: Martin Peglow

### 2.2 Lehre

Im Sommersemester 1960 begann Prof. Schulze seine Lehrtätigkeit mit einer einführenden Vorlesung über die optische Feinmesstechnik. So hielt er im ersten vollen Studienjahr 1960/61 mit vier Semesterwochenstunden die Vorlesungen „Mess-Optik I“ und „Mess-Optik II“, die von einem Praktikum „Mess-Optik“ begleitet wurden. Bis 1976 baute er Lehrveranstaltungen auf, die Vorlesungen und Übungen zum Thema „Optische Grundgesetze“ und „Optische Messgeräte in Messtechnik und Maschinenbau“ zum Inhalt hatten. Darüber hinaus gab es die Vorlesung „Modern Optics“ mit 2 Semesterwochenstunden, das Praktikum „Messung optischer Grundgrößen“ mit 4 Semesterwochenstunden und das Seminar „Technische Optik“. Bei diesen Lehrveranstaltungen ließ Prof. Schulze seine wissenschaftlichen Mitarbeiter in starkem Maße mitwirken, damit sie ihre Erfahrungen in der Lehre sammeln konnten. Er beschaffte für sie auch Lehraufträge, durch die das Lehrangebot für die Studenten auf dem Gebiet der Technischen Optik erweitert wurde. So lehrte Martin Dreher „Praktische Photoelektronik“, Klaus Leonhardt „Holographie, Grundlagen der Laser- und Fourieroptik“ und Martin Peglow „Optische Vermessung Technischer Konstruktionen“. Prof. Schulze gewann auch ab Sommersemester 1962 Prof. Dr. Horst Köhler von Carl Zeiss Oberkochen dafür, seinen viersemestrigen Vorlesungszyklus über Themen der rechnerischen und physikalischen Optik auch für Studenten des Maschinenbaus zu halten. Prof. Köhler setzte sich sehr für die Entwicklung des ITO ein. Prof. H. Köhler war im Juni 1945 zusammen mit 80 Mitarbeitern von Carl Zeiss Jena von der amerikanischen Besatzungsmacht nach Oberkochen gebracht worden. Prof. H. Köhler wusste, wie wichtig eine enge Verbindung zwischen Wissenschaft und Industrie ist und hatte daher großes Interesse am Aufbau des ITO. Außerdem übernahm Prof. S. Magun einen



Optischer Baukasten

Lehrauftrag über „Technische Photographie“. So wirkte das ITO an den Studiengängen „Feinwerktechnik“, „Physikingenieurwesen“ und „allgemeiner Maschinenbau“ mit. Die Lehrveranstaltungen wurden auch den Kandidaten für das höhere Lehramt an gewerblichen Schulen im Vertiefungsgebiet „Feinwerktechnik“ angeboten. Es gab auch das Feinwerk-Kolloquium, in dem wissenschaftliche Ergebnisse und Antrittsvorlesungen vorgestellt wurden. Im Herbst 1976 hatte Prof. Schulze sein Institut auf sechzehn Räume und zeitweilig bis zu zehn Mitarbeitern ausgebaut.

In der Zeit von 1962–1976 wurden im ITO etwa 70 Studienarbeiten und 17 Diplomarbeiten von Studenten der drei genannten Fachrichtungen ausgeführt. Prof. Schulze betreute intern Dissertationen, die aus der Forschungstätigkeit des ITO hervorgingen und war auch Hauptberichter für Dissertationen, die in der optischen Industrie durchgeführt wurden. Dabei handelte es sich in erster Linie um Themen der Optischen Feinmesstechnik, der Interferometrie, der Messung optischer Grundgrößen und der Photoelektronik.

## 2.3 Forschung

Forschungsaufträge konnte Prof. Schulze von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), der Richard-und-Annemarie-Wolf-Stiftung und dem Bundesministerium für Forschung und Technologie für das Institut einwerben. Er gewann auch für das Institut die Unterstützung der Vereinigung von Freunden der Universität Stuttgart, der Vereinigung zur Förderung der Technischen Optik und in Form von Sachspenden der Firmen der optischen Industrie. Aus diesen Forschungsarbeiten sind die Dissertationen entstanden, die Prof. Schulze intern betreut hat. Die Themen gehörten hauptsächlich in die Sachgebiete

Technische Optik, Holographie, Interferometrie und berührungslose optische Messtechnik. Hier ist besonders die Entwicklung der mikrooptischen Bank von Friedrich Aurin [1] im Jahr 1964 zu erwähnen, für die die Firma Spindler und Hoyer die Lizenz für die Fertigung erwarb und die noch heute in abgewandelter Form weltweit vertrieben und benutzt wird. Die Motivation dafür war, optischen Bauteilen einheitliche Anschlussmaße zu geben, die in Verbindung mit mechanischen Bauelementen stabile und variable Versuchsaufbauten ermöglichen.

## 2.4 Interimsleitung durch Prof. Dr. Günther Glaser

In der Übergangsphase bis zur Berufung eines neuen Lehrstuhlinhabers stand das ITO von Dezember 1976 bis 30.4.1978 unter der kommissarischen Leitung von Prof. Dr. Günther Glaser. Prof. Glaser leitete den Lehrstuhl für Uhrentechnik und Feinmechanik und das Forschungsinstitut für Uhren- und Feinwerktechnik der TH Stuttgart. Prof. Glaser wurde in dieser Zeit von den wissenschaftlichen Mitarbeitern Dr. Klaus Leonhardt, Dipl.-Phys. Karl Lenhardt und Martin Peglow beraten und unterstützt, insbesondere die Grundvorlesung „Optische Grundgesetze“ wurde durchgängig von ihnen gelehrt. Die Vorlesung „Modern Optics“ mit ausgewählten Inhalten wie Interferometrie, Farbmetrik und Kohärenz wurde bis zur neuen Besetzung des Lehrstuhls weiter von den wissenschaftlichen Mitarbeitern gehalten. Martin Peglow verwaltete das Institut.

[1] „Optischer Baukasten“, F. Aurin, *Optik* 1964, S. 680

## 3

## Ausbau und Erweiterung 1978–2002

### 3.1 Neue konzeptionelle Ausrichtung und Erweiterung des ITO

Am 1. Mai 1978 übernahm Prof. Dr. hab. Hans J. Tiziani die Leitung des Instituts für Technische Optik der Universität Stuttgart. Prof. Tiziani brachte beste Voraussetzungen für die weitere Entwicklung des ITO mit. Er hatte die Optik von Grund auf gelernt, verfügte über hervorragende theoretische Kenntnisse und dazu auch beste praktische Erfahrungen beim Einsatz der Technischen Optik in der Industrie. Als ehemaliger Direktor des Zentrallabors der Firma Wild, Heerbrugg, kannte er die Probleme der optischen Industrie genauestens. Deshalb waren ihm stets innovative Messtechniken wichtig, die in der industriellen Qualitätskontrolle optischer Oberflächen und optischer Systeme, in der Oberflächenanalyse und bei 3-D-Messungen angewendet werden können. Er richtete das Institut konzeptionell neu aus.

Die Forschungsziele wurden auf innovative Gebiete der hochaufgelösten Oberflächen- und 3D-Messtechnik gelegt, insbesondere im Mikro- und Nanobereich, der Speckle-Interferometrie und Holografie sowie der optischen Informationsverarbeitung und -speicherung. Als einer der ersten führte er neue Gebiete wie die digitale Holografie, die zeitaufgelöste Speckle-Holografie und die Anwendung nichtlinearer Kristalle in der Holografie in Lehre und Forschung ein.

Die Finanzierung der dazu notwendigen personellen und technischen Basis war anfangs schwierig. Er gewann bald das Interesse der Wirtschaft und der Industrie in Baden-Württemberg und konnte dank der Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, des BMBF und der EU die Finanzierung durch beachtliche Drittmittel erweitern, um weitere Mitarbeiter einstellen zu können.

Schon 1979 begannen erste Forschungsprojekte mit 14 Mitarbeitern mit den Themen Asphärenprüfung mit computergenerierten Hologrammen, holografische Interferometrie mit photorefraktiven Speichern und 2-Wellenlängenverfahren zur Oberflächen- und Formmessung. Die traditionelle optische Fertigungsmesstechnik und Qualitätskontrolle gewann durch die aufstrebende Industrie in Baden-Württemberg immer mehr an Bedeutung. Ein Schwerpunkt wurde die mikroskopische 3D-Messtechnik, basierend auf der mikroskopischen Streifenprojektion, der konfokalen Mikroskopie und den Weißlichtverfahren. Unter Prof. Tiziani entwickelte sich das Institut für Technische Optik zu einem integralen Bestandteil der Fakultät Maschinenbau in Forschung und Lehre. Darüber hinaus wirkte Prof. Tiziani in der Leitung der Universität mit und vertrat auch dort seine neuen Konzepte. Von 1982 bis 1986 war er Dekan und Prodekan der Fakultät Konstruktions- und Fertigungstechnik und Senatsmitglied. Danach war er 14 Jahre Vorsitzender des Großen Senats.



ITO-Team um 1980



**Hans Tiziani** wurde am 01.07. 1936 in St. Gallen geboren. Bei Wild Heerbrugg schloss er die Optiker Lehre mit Zusatzlehre in Feinmechanik ab. Nach seiner Techniker Ausbildung bei der Firma Wild Heerbrugg und dem Abschluss als Maschinenbauingenieur studierte er an der Sorbonne und der Optischen Hochschule Paris, schloss als Diplomingenieur auf optischem Gebiet im Jahr 1963 ab und promovierte 1967 bei Prof. Hopkins am Imperial College London in der Abteilung Physik. An der ETH Zürich übernahm er von 1968–1973 den Aufbau und die Leitung der Gruppe Optik in der Technischen Physik. Er habilitierte sich 1975 an der ETH Zürich in der Abteilung Physik. Von 1973–1978 war er Leiter des Zentralbereichs der Firma Wild in Heerbrugg. Von 1978 bis 2002 hatte er an der Universität Stuttgart den Lehrstuhl für Technische Optik inne und leitete das Institut für Technische Optik. Im Jahr 2002 ging Prof. Tiziani in den Ruhestand. Prof. Tiziani veröffentlichte mit seinen Mitarbeitern an die 400 wissenschaftliche Arbeiten und Beiträge für Enzyklopädien [1].

Tiziani war von 1982 bis 1986 Pro Dekan und Dekan der Fakultät Maschinenbau, Senatsmitglied und 14 Jahre Präsident des Grossen Senats der Universität Stuttgart. In seinem Berufsleben wurden ihm viele Ehrungen und Auszeichnungen zuteil. Tiziani war erster Europäischer Gouverner der SPIE der International Society for Optical Engineering, eine für Europäer sehr seltene Auszeichnung. Darüber hinaus war er viele Jahre im Vorstand der Schweizerischen Gesellschaft für Optik und Elektronenmikroskopie und dem Deutschen Optischen Komitee der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) sowie auch in der European Optical Society. 6 Jahre wirkte er im Direktorium der weltweit größten Optischen Gesellschaft, der SPIE mit Sitz in USA. Weiterhin war er in den Jahren 1979 bis 1984 Präsident der Europäischen Elektrooptik sowie von 1984 bis 1989 Präsident der Optics Division der Europäischen Physikalischen Gesellschaft. Er ist auch Fellow der Optical Society of America, der SPIE und der European Optical Society. Er wurde für seine außerordentlichen Verdienste auf dem Gebiet der Optik 2004 zum Ehrenmitglied der DGaO ernannt. Er erhielt 2001 eine der höchsten Auszeichnungen für sein Lebenswerk, den „Denis Gabor Award“ und 2009 den President's Award der SPIE.

### [1] Einige wissenschaftliche Arbeiten von Prof. Tiziani in Enzyklopädien und Büchern

Tiziani, H. J.; Totzeck, M.: "High-precision optical metrology for surfaces" in *Landolt-Börnstein, Laser Physics and Applications, Laser Applications, Vol.VIII/1*, eds. W. Martienssen, R. Poprawe, H. Weber, G. Herziger, Springer-Verlag, pp.405-441, 2004.

Tiziani, H.J.; Kerwien, N.; Pedrini, G.: "Interferometry" in *Landolt-Börnstein, Laser Physics and Applications, Laser Fundamentals, Vol.VIII/1, Part 2*, eds. W. Martienssen, H. Weber, G. Herziger, R. Poprawe, Springer-Verlag, pp.220-284, 2006.

Tiziani, H. J.: "Metrology" in *Advanced Optics Using Aspherical Elements* eds. B. Braunecker, R. Hentschel, H.J. Tiziani, SPIE Press, 2008.

Tiziani, H. J.: „Optical Metrology of Engineering Surfaces - Scope and Trends“, in: *Optical Measurement Techniques and Applications*, Editor: Rastogi, P.K., ISBN 0-89006-516-0, pp. 15 50, 1997.

Pedrini, G.; Tiziani, H. J.: „Digital holographic interferometry“, in: *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, ed.: P.K. Rastogi, Wiley & Sons, pp. 337 362, 2001.

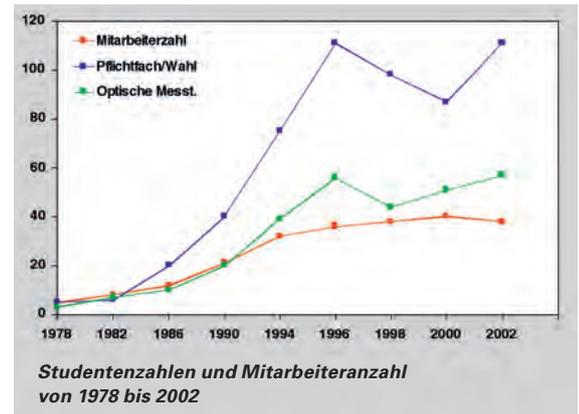
Joenathan, Ch.; Tiziani, H. J.: "Speckle and Speckle Metrology", in *The Optics Encyclopedia Vol. 4*, eds.:Th. G. Brown, K. Creath, H. Kogelnik, M. A. Kriss, J. Smit, M. J. Weber, WILEY-VCH, pp.2709-2772, 2004.

### 3.2 Lehre

Für Prof. Tiziani stand die Lehre immer an erster Stelle. Seine Lehrveranstaltungen gliederten sich in Kernfächer und Ergänzungsfächer. Zu den Kernfächern gehörte die Vorlesung „Optische Grundgesetze“, auch als Pflichtfach, „Optische Messtechnik und Messverfahren“ sowie „Optische Informationsverarbeitung“. Diese drei Vorlesungen hielt Prof. Tiziani persönlich. Dazu kamen die Ergänzungsfächer „Technische Photographie“, für die Dipl.-Phys. Karl Lenhardt einen Lehrauftrag bekam. Dr. Klaus Leonhardt hielt Vorlesungen über „Optik dünner Schichten, Oberflächen und Kristalle“ und „Grundlagen der Holografie, Laser- und Fourieroptik“. Martin Peglow lehrte die „Optische Vermessung Technischer Konstruktionen“, auch als Pflichtfach. Dr. Hannfried Zügge kam im Sommersemester 1980 mit der Vorlesung „Auslegung und Berechnung optischer Systeme“ hinzu. Zu den Lehrveranstaltungen gab es stets Übungen. Außerdem wurden die Praktika „Optik-Laboratorium“ und „Optische Messtechnik und Messverfahren“ angeboten. Die Studenten waren gehalten, im Seminar „Technische Optik“ Vorträge über ihre Arbeiten zu halten. Ab dem Wintersemester 1996/97 hielt Dr. Michael Totzeck die Vorlesung „Messtechniken für

Mikrostrukturen“. Diese Struktur der Lehrveranstaltungen wurde in der weiteren Entwicklung des ITO bis zum Jahr 2002 beibehalten.

Die Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Institutionen an interessanten Aufgaben der Optik motivierte auch die Studenten: So stiegen in den Vorlesungen von Prof. Tiziani mit der Anzahl der Mitarbeiter auch die Studentenzahlen.



#### Langjährige Dozenten im ITO:



Martin Peglow



Apl.-Prof. Dr. Klaus Leonhardt



Dr. Karl Lenhardt



Dr. Hannfried Zügge



Dr. Michael Totzeck

Die Grafik zeigt ab 1986 einen beachtlichen Anstieg von Studenten, die sich für die Pflicht- und Wahlfächer eingetragen haben. Alle Studenten haben ihre Prüfungen mit guten bis sehr guten Leistungen abgeschlossen. Zu dieser Zeit waren durchschnittlich 35 Mitarbeiter, zusätzlich mehrere Gastwissenschaftler und Hilfswis-

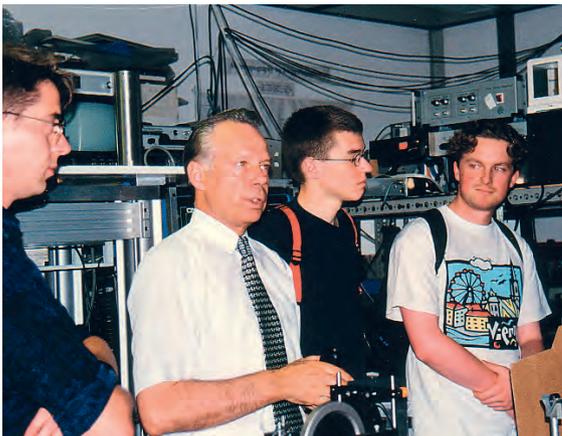
senschaftler am ITO beschäftigt. Jährlich gab es Exkursionen und einen beliebten Institutsausflug mit Spaß und Abenteuer.



Ausflug in die Schwäbische Alb



Bootsfahrt auf dem Neckar



Prof. Tiziani mit seinen Studenten im ITO

Prof. Tiziani hat im Laufe seines Berufslebens stets als Hochschullehrer vorbildlich gewirkt. Seine Disziplin und seine hochgesteckten Maßstäbe haben bewirkt, dass eine große Zahl hochqualifizierter Studenten nach ihrem Abschluss in bedeutende Stellungen der Forschung, Lehre und Industrie gingen und seine Forschungen weiterführten. Hier ist besonders zu nennen das Unternehmen Zeiss AG in Oberkochen, das viele Absolventen und Doktoranden aus dem ITO im Laufe der Zeit eingestellt hat, aber auch Leica und Hensoldt AG, Jos. Schneider Optische Werke GmbH und Karl Storz, Swissoptik AG und Zygo Incorporation in den USA. Prof. Tiziani war in mehreren Gremien von großen Unternehmen vertreten und setzte sich dort immer wieder für eine nachhaltige Verbindung von Wissenschaft und Wirtschaft ein.

**ITO-Absolventen haben führende Positionen, z.B. in den Firmen:**

Zeiss AG  
 Agilent  
 Bosch  
 Daimler  
 ESA/DLR  
 Europäisches Patentamt  
 Heidenhain  
 Hensoldt  
 Fisba Optik  
 Leica  
 Swiss Optic  
 Oerlikon-Contraves  
 Rodenstock  
 Schneider  
 Karl Storz  
 TRUMPF  
 HNO-Universitätsklinik  
 Tübingen  
 Zygo, Wyko  
 Precitec  
 Schweizer Elektronik KG  
 Tfmessstechnik teltow  
 Polytec  
 Bundesamt für  
 Wehrtechnik Koblenz  
 Trioptik Hamburg  
 Leister Process  
 Technologies Salem

University of Arizona,  
 Professur

Hochschul-Professuren:  
 HS-Aalen, HS Esslingen,  
 HS Weingarten/Buchs

### 3.3 Forschung

Bereits 1979 begannen Forschungsvorhaben, die sich mit Grundlagenforschung, aber auch anwendungsorientiert mit wirtschaftlichen Fragestellungen in der technischen Optik befassten. Zunächst ging es um die Prüfung und Kalibrierung von asphärischen Flächen, eine komplexe Aufgabenstellung, die heutzutage aktueller denn je ist. Methoden zur berührungslosen 2D- und 3D-Messung wurden entwickelt. Für die Echtzeit-Informationsverarbeitung großer Datenmengen wurden Programme erarbeitet. Das ITO beteiligte sich an Forschungsvorhaben zur optischen Oberflächenprüfung des Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung. Für die Bildübertragung mit bester Qualität und die Messung der Störeinflüsse der Atmosphäre wurde eine Anlage zur Messung der optischen Übertragungsfunktion abbildender Systeme aufgebaut. Das neue Arbeitsgebiet Infrarot-Messtechnik wurde eingerichtet. Arbeiten zur Untersuchung des Einflusses der Polarisation auf lichtoptische Interferenzerscheinungen, aber auch Abstands- und Distanzmessungen wurden besonders betrieben. Die Mikroprofilometrie wurde unter Hinzunahme der Mikroellipsometrie erweitert. Dabei wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Höhenprofil und ellipsometrischem Profil gefunden, für die Messtechnik ein wichtiges Ergebnis.

In den 80ziger Jahren erlebte die angewandte Optik mit den verschiedenen Laseranwendungen einen markanten Aufschwung. Ohne Rechnerunterstützung wären aber viele Experimente nicht durchführbar gewesen. Insbesondere die holografischen Speckle- und Moiré-Methoden wurden durch digitale Bildverarbeitung erst industriereif. Die Multipulstechnik wurde zur hochdynamischen Verformungs- und Schwingungsmessung eingesetzt. So lag ein nachhaltiger Schwerpunkt der Tätigkeiten im ITO auf dem Gebiet der digitalen Informationsverarbeitung. Zur Modellierung der Bildentstehung in der Hellfeldmikroskopie wurden in den 90ziger Jahren numerische Simulationen durchgeführt. Diese

basierten auf den Grundlagen der „Rigorous Coupled Wave Analysis“ (RCWA) und wurden mit dem von Dr. Michael Totzeck entwickelten Programmsystem MICROSIM berechnet. Das führte auch zum Einstieg in die Nanotechnologie. Zur Erkennung und Klassifikation von Mustern wurden neuronale Netze untersucht. Darüber hinaus wurde die codierte Beleuchtung für die Topographiebestimmung untersucht. Interessant wurde auch die optische Sensorik in Verbindung mit medizinischen und biomedizinischen Anwendungen wie der Einsatz der optischen Pinzette.

Das ITO arbeitete an Teilbereichen von fünf großen Sonderforschungsbereichen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) mit. Der Sonderforschungsbereich 228 „Hochgenaue Navigation – Integration navigatorischer und geodätischer Methoden“ hatte sich bei seiner Gründung im Jahre 1984 zur Aufgabe gestellt,



Dr. Giancarlo Pedrini:  
Speckletechnik



Dr. Robert Windecker:  
Weißlichtinterferometrie

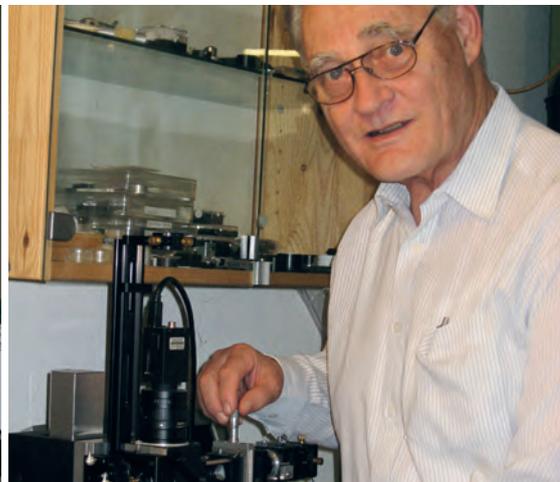
die speziellen Verfahren und Denkweisen geodätischer und navigatorischer Methoden für genaue Vermessungsaufgaben nutzbar zu machen. Echtzeitlösungen hochgenauer Navigation und automatischer Positionsbestimmung wurden erreicht. Das vielfältige Potential der Navigationssysteme für hochgenaue kinematische Vermessungs- und Steuerungsaufgaben wurde erschlossen, womit man dem zunehmenden Automatisierungsbedarf in vielen technischen Bereichen entsprach. Der Sonderforschungsbereich 228 wurde 1995 erfolgreich abgeschlossen.

Der zweite Sonderforschungsbereich 158 „Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb“ wurde auch Mitte 1984 eingerichtet und nach mehreren positiven Begutachtungen 1995 beendet. Sprecher war Prof. Dr.-Ing. H.-J. Warnecke, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart.

Zielsetzung des Sonderforschungsbereiches war es, durch Grundlagenuntersuchungen und anwendungsnahe Forschung in Form von intensiver interdisziplinärer Zusammenarbeit von Natur-, Ingenieur-, Betriebs- und Arbeitswissenschaftlern neue Methoden und Modelle für den Montagebetrieb der Zukunft zu entwickeln. Als Pilotprojekt wurde zusammen mit Industriepartnern ein Transferbereich zur Überführung der Ergebnisse in die Wirtschaft eingerichtet. Prof. Tiziani war in allen Sonderforschungsbereichen Stellvertreter der Sprecher. Das Zusammenspiel von Optik, Feinwerktechnik und Informationstechnik spielte bei der Durchführung der Forschungen stets eine entscheidende Rolle.



Dr. Michael Totzeck:  
Numerische Simulationen



Apl.-Prof. Dr. Klaus Leonhardt:  
Mikroprofilometrie

### **Schwerpunkte der Konzeption:**

- **Hochaufgelöste Oberflächenmesstechnik**
  - Weißlicht-Interferometrie
  - Konfokale Mikroskopie
  - Streifenprojektion
- **Speckle-Interferometrie/Digitale Holografie**
  - Kurzpuls und Doppelpuls-Lasertechnik
  - holografische Endoskopie
- **Optik in der Medizin und Biomedizin**
- **Interaktion von Lichtfeldern mit dem Messobjekt**
  - Ultrapräzisionsmesstechnik/Nano-Messtechnik
- **Design optischer Meßsysteme und Komponenten**
  - diffraktive Optik
  - Mikrooptiken
  - CGH
- **Aktive und adaptive Optik**
  - Flüssigkristalle, LCoS, DMD
  - verformbare Spiegel
  - optische Pinzette

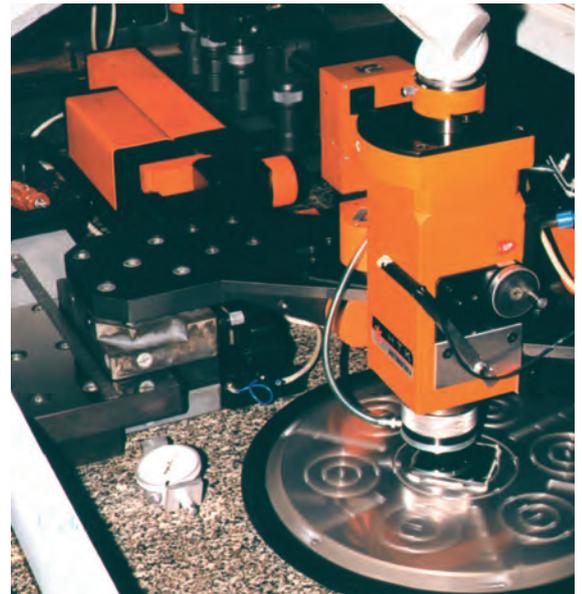
Die Sonderforschungsbereiche wirkten sich positiv auf die Entwicklung des ITO und die horizontale Vernetzung innerhalb der Universität Stuttgart aus. So wurden ab 1990–2002 die Arbeiten für den SFB 349 „Hochdynamische Strahlführungs- und Strahlformungseinrichtungen für die räumliche Bearbeitung mit Laserstrahlen“ aufgenommen. Zielsetzung bei diesem SFB war, das fertigungstechnische Potential der Lasermaterialbearbeitung voll auszuschöpfen und Lasersysteme möglichst effizient zu nutzen. Das verlangte intensive Untersuchungen und Entwicklungen des Themenkreises der schnellen, hochgenauen Strahlführung und -formung. Deshalb lagen die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten auf der Entwicklung effizienter Diagnostikverfahren, der Entwicklung von strahlungsfesten Komponenten zur Strahlführung und der Untersuchung und Bereitstellung von steuerungs- und regeltechnischen Methoden und Verfahren zur hochgenauen Strahlführung. Hierfür wurde eine neue Geräte- und Komponententechnik entwickelt. Die erforderlichen optischen Elemente wie adaptive Spiegel, Spiegel in Leichtbauweise und strahlungsfeste holographische Elemente in Kupfer und Quarz wurden konzipiert, hergestellt und geprüft. Sie führten zusammen mit hochdynamischen Spiegelpositioniersystemen zu einer neuen Konzeption und zum Bau hochwertiger Strahlführungs- und -formungseinrichtungen.



*Dr. Christel Budzinski:  
Strahlungsfeste optische  
Komponenten*

Die Kenntnis von Phasenbeziehung und Intensitätsverteilung des Laserstrahls unmittelbar vor der Bearbeitungsoptik bildete die Basis zur Regelung seiner geometrischen Eigenschaften am Werkstück. Hierzu gehörten sowohl angepasste Kinematiken für Industrieroboter mit integrierter Strahlführung als auch neue Maschinenkonzepte, die einen flexiblen Maschinenaufbau in Form eines Laserbearbeitungszentrums erlauben. Hier wurde ebenfalls ein Transferbereich etabliert und die Ergebnisse zusammen mit der Industrie weiterentwickelt und eingesetzt.

Im Rahmen dieses SFB 349 wurde zur Herstellung von computergenerierten Hologrammen ein Laserbelichtungssystem für Mikrostrukturen aufgebaut. Damit wurde die Basis für die Herstellung von diffraktiven Optiken am ITO gelegt.



*Polarkoordinaten Laserbelichtungsanlage CLWS 300*

### 3.4 Nationale Wirkung

Die Leitung des SFB 349 lag in den Händen von Prof. Dr. Helmut Hügel, Direktor des Instituts für Strahlwerkzeuge (IFSW). Dieses Institut wurde im Jahr 1986 auf Initiative und mit Unterstützung von Prof. Tiziani mit dem Ziel gegründet, Fertigungsverfahren basierend auf Laserstrahlung zu erforschen und deren Einführung in die industrielle Produktion zu unterstützen. Im SFB 349 ergab sich eine lange Zeit erfolgreicher Zusammenarbeit des ITO mit dem IFSW, seinem Institutsleiter Prof. Dr. Helmut Hügel und weiteren fünf Instituten der Uni Stuttgart und mit dem Unternehmen Trumpf GmbH. Hier ging es vor allem um die Integration der strahlführenden Optiken in Roboter für das Laserschweißen im Automobilbau.

Weitere Sonderforschungsbereiche waren der SFB 514 „Aktive Exploration“, in dem die Sensor-Aktor Kopplung für adaptive Mess- und Prüftechnik untersucht wurde. Beteiligt waren sieben Institute der Universität Stuttgart mit 15 Projekten. Das zentrale Thema war das Zusammenspiel von unterschiedlichen Sensoren, die zur Steuerung der Aktoren eingesetzt wurden, ein Thema, das heute noch sehr aktuell ist. Der SFB 514 wurde im Jahr 2000 abgeschlossen.

Im SFB 543 „Ultraschallbeeinflusstes Umformen“ metallischer Werkstoffe war das Forschungsziel, durch Schwingungsbeeinflussung die Umformkräfte sowie die Reibungskräfte zu reduzieren und die Werkstückeigenschaften verändern. Im ITO wurden die Ultraschalleinflüsse untersucht. Endoskopische Sensoren und Bildverstärker wurden benutzt. Form- sowie Schwingungsmessverfahren, punktweise als auch flächenhaft wirkend, wurden erfolgreich entwickelt und eingesetzt. Die flächenhafte Messung basierte auf der digitalen holografischen Interferometrie. Der SFB 543 wurde 2003 abgeschlossen.

Ein Landesschwerpunktsprogramm von 1993 bis 1996 beinhaltete „Minimal invasive laserchirurgische Eingriffe“. Partner waren die Eberhard Karls Universität Tübingen, das Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik an der Universität Ulm, der Lehrstuhl für Strahlenbiologie der Universität Münster und das Max-Planck-Institut für Zellbiochemie in Martiensried. Das ITO entwickelte die messtechnischen Verfahren zusammen mit der Universität Tübingen zur Messung und Diagnose der Innenohrmechanik. Das Messverfahren wurde weiterentwickelt und in der Praxis angewendet. Ein weiteres Projekt dieser Zusammenarbeit war die Entwicklung eines hochauflösenden Verfahrens für die Vermessung der Hornhaut des menschlichen Auges, das ebenfalls in der Praxis eingesetzt wird.

Im Jahr 2000 wurde der von den Verbänden der deutschen Industrie und Wissenschaft initiierte und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Strategieprozess Deutsche Agenda „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ angestoßen, der den optischen Technologien in der Zukunft eine entscheidende Schlüsselfunktion und somit eine hervorragende technologische Bedeutung und wirtschaftliche Relevanz bescheinigte. Integriert war das Programm „Laser 2000“, an dessen Gestaltung und Ausarbeitung Prof. Tiziani entscheidend beteiligt war. Im Rahmen dieses Programms flossen Fördermittel des BMBF in die sachbezogenen Themen des ITOs und trugen wesentlich zur weiteren Entwicklung des Instituts bei. DFG, BMBF, die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und die Baden-Württemberg Stiftung haben in dankenswerter Weise nachhaltig und langjährig in vielen Projekten die Forschungsarbeiten des ITO unterstützt. Ohne diese Unterstützung wäre das ITO nicht so erfolgreich geworden.

Prof. Hans Tiziani hat in seinen langjährigen Arbeiten starke Kooperationen mit der Industrie aufgebaut, insbesondere mit der Carl Zeiss AG, der JENOPTIK AG, Leica, Karl Storz und der Sick AG.



Prof. Tiziani

### 3.5 Internationale Wirkung

Einige europäische Projekte liefen von 1987 bis 2000 im Förderprogramm der EU:

■ **Brite 1987–1990:** „Development of non-destructive high precision test methods for aspheric components and tools in optics“.

Partner waren Philips Research, Eindhoven, NL und Cerco Paris, Frankreich

Inhalt des Projekts waren absolute Messungen der Oberfläche und der Form von Asphären mit einer NA bis zu 0.99. Die Ergebnisse wurden von den Industriepartnern erfolgreich eingesetzt.

■ **BCR DIMIOS 1991–1994**

„Development of in-line measurement techniques for optical quality and position of elements in small integrated optical systems“

Partner war Philips Research, Eindhoven, NL

In diesem Projekt wurden Methoden zur Vermessung der Pressform für die Herstellung der hybriden Optik für CCD Abgriffe entwickelt. Die Verfahren wurden in der Produktion bei Philips in Eindhoven eingesetzt.

■ **ESTEC /ESA 1992–1995**

Optical Surface Profile Monitor

Partner waren Daimler-Benz Aerospace Ottobrunn, Officin Galileo, Florenz, I, Institute of Microtechnology, Universität Neuchatel, CH, das Institut für Nachrichten- und Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Wien. Es wurde ein Modell für ein 2 Wellenlängen-Heterodyn Interferometer entwickelt, getestet und erfolgreich eingesetzt.

■ **MOSIS 1996–1999**

Micro Optical Silicon System „Development and applications of novel optoelectromechanical systems micro machined in silicon“

Partner waren: Technische Universität Delft, NL, Imperial College London, UK, (Prof. Dainty), University of Edinburgh, UK und Thomson CSF, F. Weiterhin das Institut für Microtechnique, University of Neuchatel, CH, (Prof. Dändliker) und die Laser und Medizin Technologie GmbH Berlin. In diesem Projekt wurden adaptive Silizium Membranspiegel konzipiert und ihre Eigenschaften untersucht. Die aktive Wellenfontanpassung wurde in unterschiedlichen Projekten angewendet, z. B. bei der Asphärenprüfung und der automatisierten Strahlkoppung.

Die Arbeiten an diesen und weiteren europäischen Verbundprojekten waren für die Wissenschaftler und Studenten interessant und förderten das Interesse der Studierenden an den optischen Technologien.



Schlüsselübergabe  
Foto: Dr. Christel Budzinski

### 3.6 Schlüsselübergabe

Anfang September 2002 fand im Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart ein Wechsel in der Leitung statt. Prof. Dr. Hans Tiziani, der das Institut für Technische Optik 24 Jahre mit großem Erfolg geleitet hat, ging in den Ruhestand. Auf den Lehrstuhl und als Institutsleiter wurde Prof. Dr. Wolfgang Osten berufen, bisheriger Leiter der Abteilung Optische Messtechnik am Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH (BIAS). Prof. Tiziani führte noch eine Reihe von Doktorarbeiten und Forschungsprojekten zu Ende, bevor er sich anderen Aufgaben zuwendete.

Prof. Tiziani übergab ein Institut mit ausgezeichnetem wissenschaftlichen Ruf, das international anerkannt ist und zu den größten in Deutschland zählt. Die thematische Ausrichtung wurde von Prof. Tiziani über Jahrzehnte gut ausbalanciert zwischen Grundlagenforschung, angewandter Forschung und industrienaher Anwendung der Ergebnisse.

#### **Internationale Kooperationen**

Philips Research, Eindhoven, NL  
Cercos Paris, Frankreich  
Officina Galileo, Florenz, Italien  
Thomson CSF  
Institute of Microtechnology,  
Universität Neuchatel, Schweiz  
Institut für Nachrichten- und  
Hochfrequenztechnik der Techni-  
schen Universität Wien  
Technische Universität Delft, NL  
Imperial College London, UK  
University of Edinburgh, UK  
University of Rochester, USA  
Universität von Nowosibirsk, RUS  
Weizmann Institut, Israel  
ETH Zürich, Lousanne

## 4

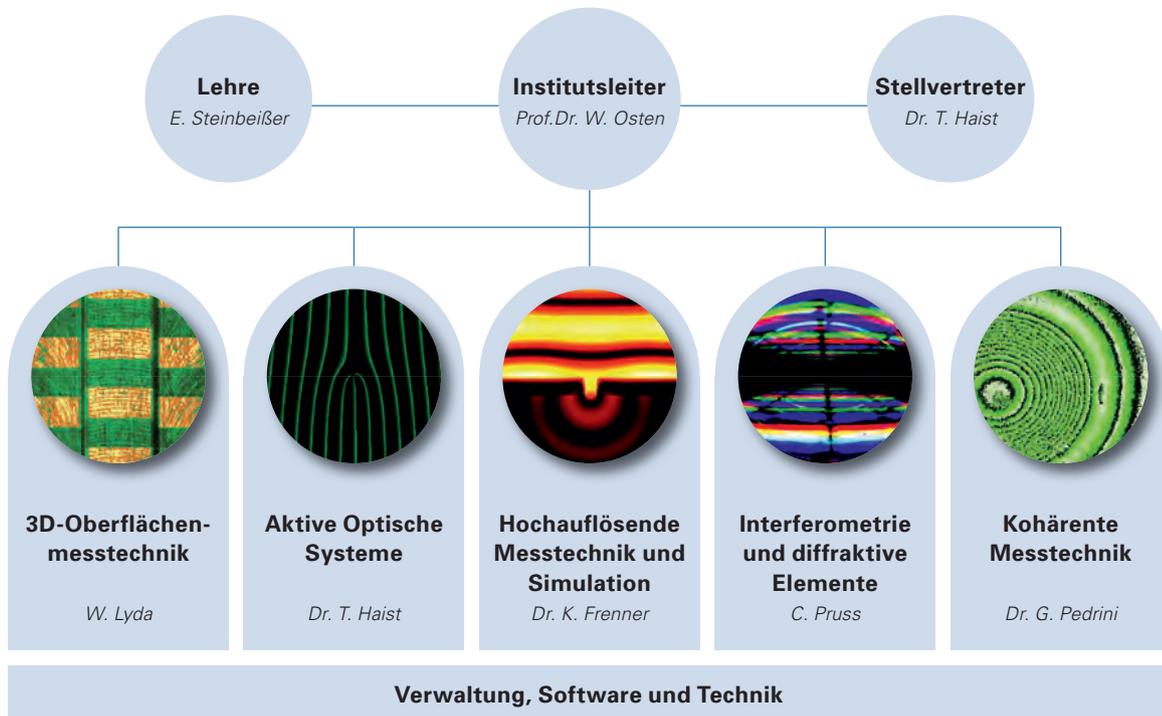
## ITO heute – ab 2002

### 4.1 Die ITO-Struktur heute

Auch heute fühlt sich das Institut für Technische Optik als Teil der Fakultät für Maschinenbau der Universität Stuttgart sowohl der Grundlagenforschung als auch der anwendungsnahen Forschung verpflichtet. Das Institut vertritt das Fachgebiet Technische Optik in Forschung und Lehre. In Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern konzentrieren sich die Forschungsarbeiten des Instituts auf die Untersuchung neuer optischer Messprinzipien und deren Implementierung in Einzelsensoren und Sensorsystemen. Dabei kommen moderne optische Komponenten und Strategien zum

Einsatz, deren Zusammenspiel durch die Verbindung von physikalischer Modellierung, rechen technischer Simulation und aktiv-rückgekoppelter Messung gekennzeichnet ist.

Rund 35 angestellte Mitarbeiter sind in fünf Forschungsgruppen tätig, die auf den folgenden Seiten vorgestellt werden. Offene Türen, gruppenübergreifende Projekte und eine gute Tradition des informellen, effizienten Kompetenzaustauschs zwischen den Gruppen erhalten die Struktur als einen lebenden, sich kontinuierlich weiterentwickelnden Organismus.

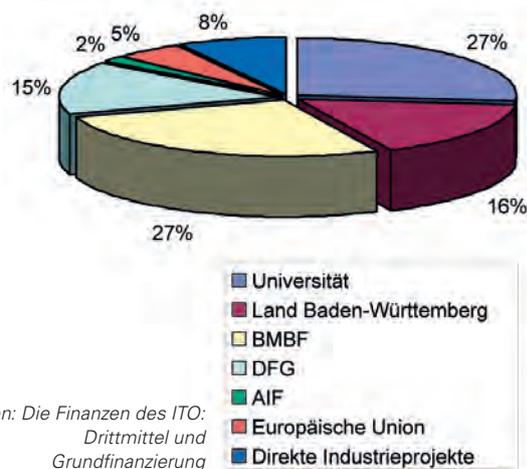




**Wolfgang Osten**, 1952 in Steinbach-Hallenberg (Thüringen) geboren, studierte Physik an der Universität Jena und befasste sich schon in seiner Diplomarbeit (1979) mit Kohärenzoptik. Anschließend war er an der Akademie der Wissenschaften der DDR in Berlin tätig. Er promovierte 1983 an der Martin-Luther-Universität in Halle-Wittenberg über ein Thema der kohärenten Messtechnik. Die Erkenntnis, dass digitale Bildverarbeitung eine unverzichtbare Komponente für künftige optische Messsysteme ist, führte ihn 1984 an das Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) an der Akademie der Wissenschaften der DDR. 1988 übernahm er hier die Leitung des Forschungsbereichs Bildverarbeitung – des späteren Instituts für Bild-

verarbeitung am ZKI. Nach der Habilitation (1990) ging er 1991 an das Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik (BIAS) und gründete hier die Abteilung Optische 3D-Sensorik. Im Jahr 2001 erhielt er einen Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Optik der TU Ilmenau, gab jedoch dem Ruf auf den gleichnamigen Lehrstuhl der Universität Stuttgart den Vorzug. Von 2006 bis 2010 war er in der Universitätsleitung als Prorektor für Forschung und Technologie tätig. Prof. Osten ist Mitbegründer und Sprecher von SCoPE, dem Stuttgart Research Center of Photonic Engineering.

Die Grundfinanzierung des Instituts über Haushaltsstellen und Haushaltsmittel beträgt in etwa 25%. Der Hauptanteil mit etwa drei Vierteln des Institutsumsatzes wird über Drittmittel eingeworben, wobei das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die Baden-Württemberg-Stiftung mit ihren Forschungsprogrammen im Bereich der Optischen Technologien wichtige Fördermittelgeber sind. Projekte aus dem Bereich der Grundlagenforschung, gefördert über die Deutsche Forschungsgemeinschaft, bilden die ideale Basis für die Untersuchung neuer, zukunftsweisender Ideen. Das Institut gehört zu den Ingenieurwissenschaften, entsprechend ist der Wissenstransfer in die Wirtschaft ein wichtiger Bestandteil der Arbeiten: rund 40% der Institutsmittel sind industriefinanziert oder industrie-co-finanziert.

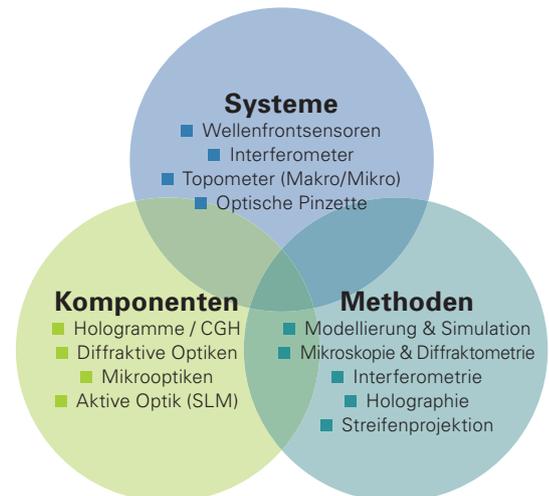


oben: Die Finanzen des ITO:  
Drittmittel und  
Grundfinanzierung

rechts: Angewandte optische Methoden und ihre  
Implementierung in neuen optischen Komponenten,  
Sensoren und Sensorsystemen

Die folgenden Seiten stellen neben den Arbeitsgruppen und den Aktivitäten des ITO in der Lehre eine Auswahl von aktuellen Forschungsschwerpunkten vor. Diese beinhalten Themenfelder mit zum Teil schon jahrzehntelanger Tradition am ITO, wie die digitale Holografie oder die Asphärenmesstechnik, aber auch ganz junge Themen, wie der spannende Themenkomplex der Metamaterialien.

Alle diese Themen lassen sich in drei übergeordnete, miteinander verzahnte, wechselseitig abhängige Gebiete einordnen: Systeme, Methoden, Komponenten. In allen Feldern arbeitet das ITO: bei den Komponenten, wenn es um die Charakterisierung von Lichtmodulatoren oder die Herstellung von Spezialoptiken mit diffraktiven Funktionsflächen geht, sehr intensiv auch bei den Methoden, wenn neue Messansätze oder Simulationen entwickelt werden und schließlich im Bereich der Systeme, denn am Ende eines Forschungsprojektes steht oft ein System, das als Prototyp oder im industriellen Einsatz seine Spezifikationen erfüllen muss.





### 3D-Oberflächenmesstechnik

**Die Erkundung neuer Methoden zur dreidimensionalen Erfassung von technischen Objekten und deren Implementierung gehört traditionell zu einem Forschungsschwerpunkt am Institut für Technische Optik. Die Gruppe 3D-Oberflächenmesstechnik implementiert und charakterisiert optische Oberflächen- und Formmessgeräte, um die Robustheit und Rückführbarkeit der Messdaten optischer Sensoren zu verbessern und so die Forderungen an moderne und fertigungsnahe Inspektionssysteme in der Qualitätssicherung erfüllen zu können.**

Die Zahl der in der Qualitätssicherung eingesetzten optischen Messsysteme hat sich in den letzten Jahren deutlich vergrößert. Insbesondere im Bereich der Charakterisierung und Inspektion von Oberflächen werden vermehrt optische Sensoren eingesetzt. Optische Methoden verfügen hier aufgrund ihres berührungslosen und zerstörungsfreien Wirkprinzips sowie aufgrund der schnellen und flächenhaften „Antastung“ des Messobjekts über ein Potenzial, das sie für die Lösung einer Vielzahl von komplexen Inspektionsproblemen geradezu prädestiniert.

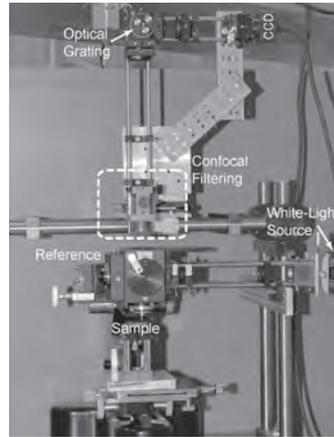
Um den Einsatz dieser Sensoren im industriellen Umfeld zu ermöglichen, müssen die Anforderungen hinsichtlich Prozesssynchronität, Zuverlässigkeit, Auflösung und Rückführbarkeit der Messungen erfüllt werden. Aus diesem Grund befasst sich die Arbeitsgruppe mit der Implementierung und Untersuchung optischer Sensoren in Wechselwirkung mit technischen Oberflächen. Die Forschungsarbeiten der Arbeitsgruppe konzentrierten sich dabei auf Sensorsysteme auf Basis der Streifenprojektion im Bereich Mikro- und Makromesstechnik, der Weißlichtinterferometrie sowie der konfokalen und chromatisch-konfokalen Mikroskopie [1-9].

Mit den wachsenden Anforderungen an die moderne Messtechnik und das kontinuierlich zunehmende Anwendungsfeld der Sensoren hat sich auch der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in der Gruppe weiterentwickelt. Die aktuellen Forschungsschwerpunkte sind:

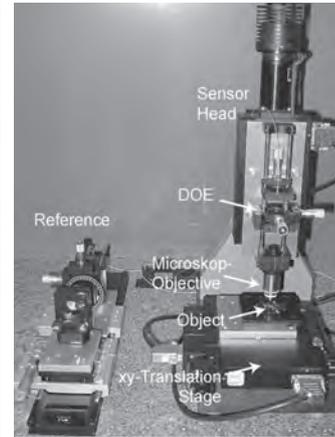
- Verbesserung der Robustheit durch hybride Messverfahren und neue „Single-Shot“-Sensorik
- Prozess- und werkzeugintegrierte Sensorik
- Steigerung der Effizienz von Inspektionssystemen durch Sensorfusion
- Modellierung und Simulation optischer Sensorsysteme zur Verbesserung von Robustheit und Auflösung (Modellgestützte Messtechnik)

Im Forschungsfeld **hybride Messprinzipien** wird daran gearbeitet, durch Kombination mehrerer Messprinzipien die Vorteile der einzelnen Systeme zu verstärken und die Nachteile zu kompensieren. Der Fokus in diesem Bereich liegt im Moment auf der Untersuchung der chromatisch-konfokalen Spektralinterferometrie (CCSI). Durch die Kombination eines Spektralinterferometers mit einem chromatisch-konfokalen Objektarm entsteht ein Sensor, der die hohe laterale Auflösung und die konstante Übertragungsfunktion der chromatisch-konfokalen Mikroskopie bei gleichzeitig hoher Dynamik und Absolutkodierung des Gangunterschieds mittels Spektralinterferometrie aufweist. Durch die chromatische Aufspaltung und die anschließende konfokale Diskriminierung kann der Tiefenmessbereich von CCSI-Sensoren bei hoher numerischer Apertur größer und flexibler gestaltet werden als bei klassischen Spektralinterferometern. Die Abbildung zeigt die Weiterentwicklung dieses Messprinzips vom Laboraufbau zu einem robusten „Common Path“-Sensor mit Mirau-Architektur. Aktuell wird im Bereich CCSI an der Weiterentwicklung vom Punktsensor zum Liniensensor sowie der Sensorcharakterisierung und Modellierung gearbeitet.

Evolution der chromatisch-konfokalen Spektralinterferometrie (CCSI) am ITO von 2005 bis 2010



CCSI-Linnik-Testaufbau



CCSI-Faserinterferometer



CCSI-Mirau-Sensor

Ein neuer Ansatz zur robusten „**Single-Shot**“-**Interferometrie (ROSI)** für die Profilmessung auf der Grundlage der Kurzkohärenz-Interferometrie basiert auf der Generierung von räumlichen, linienförmigen Interferogrammen für ein Höhenprofil, ohne dass ein mechanischer Scan erfolgen muss. Jedes Interferogramm wird durch die Überlagerung einer Objektwelle mit einer geeigneten Referenzwelle gewonnen, wobei zur Abbildung auf eine Matrixkamera auch Zylinderoptik zum Einsatz kommt. Die Neigung der Referenzwellen entsteht durch Implementierung eines Lateral-Shears im Referenzarm durch Reflexion an miniaturisierten Drei-Spiegel-Reflektoren. Die Erfassung eines Linienprofils erfolgt durch eine Vielzahl parallel liegender, durch die Zylinderoptik schmal gemachter Weißlichtinterferogramme in einem Interferogramm-Paket, das durch eine einzige Bildaufnahme detektiert wird. Ausgewertet werden sowohl die Einhüllende als auch die Phase eines jeden räumlichen Weißlichtinterferogramms, um die Höhenwerte im Profil zu bestimmen. Dieser Ansatz gestattet – in Verbindung mit einer Matrix von miniaturisierten Drei-Spiegel-Reflektoren im Referenzarm – innerhalb eines ausgedehnten Objekts, relevante Messpunkte zu adressieren, deren Kurzkohärenz-Interferogramme parallelisiert in einem Kamera-Frame abgelegt werden. Durch die Kurzaufnahme des Interferogramm-Pakets mittels einer schnellen Matrixkamera, oder durch den Einsatz einer gepulsten Lichtquelle kann somit auch in einer vergleichsweise rauen Fertigungsumgebung ein in sich konsistenter Satz von

Kurzkohärenz-Interferogrammen für eine Vielzahl auch zweidimensional verteilter Messpunkte gewonnen werden, ohne dass ein mechanischer Scan oder eine Spektralanalyse der Messdaten erfolgen muss. Das Verfahren wurde vom ITO 2010 zum Patent angemeldet [7].

Ein weiterer Aspekt der Forschungsarbeiten konzentriert sich auf die Untersuchung von **prozess- und werkzeugintegrierter Sensorik** und von Strategien zur in-line Sensorintegration. Durch die Integration von Sensoren in Fertigungsprozesse und Werkzeuge entsteht im Unterschied zu einer nachgelagerten Qualitätskontrolle die Möglichkeit, den Fertigungsprozess direkt auf die geforderten Qualitätsmerkmale zu regeln. Aktuell wird in der Gruppe im Rahmen eines Forschungsthemas der GSaME (Graduate School of Excellence for advanced Manufacturing Engineering, Universität Stuttgart) an der Prozessüberwachung bei der Herstellung von Präzisionswerkzeugen mit Hilfe von prozessintegrierten Weißlichtinterferometern und der Integration von Sensoren in Werkzeuge zur spanenden Bearbeitung geforscht.

Neben der Sensorentwicklung werden am Institut neue Ansätze zur Steigerung der Effizienz in Messsystemen durch **Sensorfusion** untersucht. Dabei fokussiert sich die aktuelle Forschung auf die hierarchische, flexible und automatische Verknüpfung von Sensoren in Multisensorsystemen. Auf Basis der Kombination von Prinzipien des „Computer Vision“ mit konfokalen Flächen- und Punktsensoren wurde eine automatisierte multiskalige

Mess- und Prüfstrategie erarbeitet und in einen Demonstrator zur automatischen Inspektion von Mikrolinsen-Arrays und mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS) überführt. Hier stehen die automatische Sensorauswahl und Sensorparametrisierung durch ein Assistenzsystem zur aufgabenspezifischen Nutzerunterstützung bei der Messprozess-Planung und -Steuerung sowie die Entwicklung von Algorithmen zur Erfassung unteraufgelöster Defekte zur adaptiven Sensoransteuerung im Fokus der aktuellen Forschung. Aufgrund ihrer Wichtigkeit werden die Themen „Werkzeugintegrierte Sensorik“ und „Automatische multiskalige Messtechnik und Sensorfusion“ in eigenen Kapiteln detaillierter beschrieben.

Um das Verhalten der Sensoren an nicht-kooperativen Oberflächen zu verstehen und damit eventuell auftretende Messartefakte erkennen bzw. eliminieren zu können, wird in der Gruppe intensiv an der Modellierung und Simulation optischer Sensorsysteme unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen des Sensors mit dem Messobjekt gearbeitet. Der Fokus der Arbeiten liegt aktuell auf der Weißlichtinterferometrie und der konfokalen Mikroskopie.

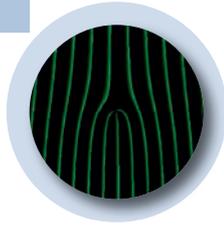
Mit der numerischen Modellierung eines Weißlichtinterferometers konnte beispielsweise der Einfluss von chromatischen Abberationen im optischen System bei der Topografiemessung gezeigt werden [8]. Diese Methode ermöglicht die numerische Simulation der Interferenz-Signale in Abhängigkeit von beliebigen lokalen Gradienten der Probe im Messfeld. Mit den Simulationsergebnissen wird eine signifikante Verringerung der Messunsicherheit erreicht.

Im Bereich der konfokalen Mikroskopie wird im Zusammenhang mit der multiskaligen Messtechnik an einem „Virtuellen Messsystem“ gearbeitet. Dieses Modell soll später zur Online-Korrektur von Fehlern im Messprozess verwendet werden und die Auswahl optima-

ler Parameter während der Planung der Messaufgabe unterstützen. Mit Hilfe erster Ergebnisse konnte ein Modell zur Parametrisierung konfokaler Mikroskope zur Messung an Mikrolinsen-Arrays erstellt werden. Weitere Forschungsarbeiten zur Modellierung zielen darauf ab, in einem hybriden Simulations-Tool strahlenoptische, wellenoptische und rigorose Simulationen miteinander zu verknüpfen, um so komplexe optische Systeme unter Berücksichtigung aller relevanten optischen Effekte in einem Modell beschreiben zu können. Um diese numerisch aufwendigen Simulationen effizient realisieren zu können, werden die entsprechenden Algorithmen direkt für moderne, hochgradig parallelisierte Rechnerarchitekturen implementiert.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Kohler, C.; Droste, U.; Körner, K.; Osten, W.: „Reduktion von Überschwingern bei der 3D-Streifenprojektion durch Inverse Filterung“, *tm Technisches Messen*, Vol. 73, pp. 595-602, 2006.
- [2] Leonhardt, K.; Droste, U.; Tiziani, H. J.: „Microshape and rough-surface analysis by fringe projection“, *Appl. Opt.* 33, pp. 7477-7488, 1994.
- [3] Windecker, R.; Haible, P.; Tiziani, H. J.: „Fast coherence scanning interferometry for measuring smooth, rough and spherical surfaces“, *Journal of Modern Optics*, Vol. 42, No. 10, pp. 2059-2069, 1995.
- [4] Tiziani, H. J., Uhde, H. M.: „Three dimensional analysis by a microlens array confocal arrangement“, *Appl. Opt.* 33, pp. 567-572, 1994.
- [5] Papastathopoulos, E.; Körner, K.; Osten, W.: „Chromatic Confocal Spectral Interferometry“, *Appl. Opt.* 45, pp. 8244-8252, 2006.
- [6] Lyda, W.; Zimmermann, J.; Burla, A.; Regin, J.; Osten, W.; Sawodny, O.; Westkämper, E.: „Sensor and Actuator Conditioning for Multi-Scale Measurement Systems on example of confocal microscopy“, *Proc. SPIE*, Vol. 7389-02, 2009.
- [7] Körner, K.; Berger, R.; Osten, W.: „Verfahren und Anordnung zur robusten Interferometrie“, *Deutsche Patentanmeldung* 22.01.2010: AZ 10 2010 006 239
- [8] Berger, R.; Sure, T.; Osten, W.: „Measurement errors of mirrorlike, tilted objects in white-light interferometry“, *Proc. SPIE*, Vol. 6616E, pp. 1-9, 2007.
- [9] Kayser, D.; Bothe, Th.; Osten, W.: „Scaled topometry in a multisensor approach“, *Optical Engineering* 43, pp. 2469-2477, 2004.
- [10] Lyda, W.; Burla, A.; Haist, T.; Zimmermann, J.; Osten, W.; Sawodny, O.: „Automated Multi-Scale Measurement System for MEMS-Characterisation“, *Proc. SPIE*, Vol. 7718, 77180G, 2010.



## Aktive Optische Systeme

**Die gezielte dynamische Variation von Wellenfronten mittels räumlicher Lichtmodulatoren ermöglicht gegenüber rein statischen optischen Systemen eine Vielzahl von Vorteilen und lässt sich in ganz verschiedenen Anwendungen erfolgreich einsetzen.**

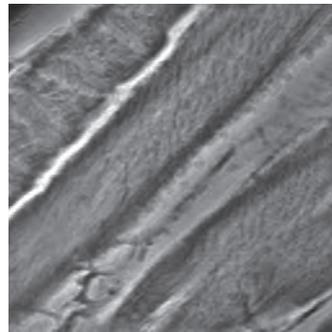
Lichtmodulatoren (engl. Spatial Light Modulators, SLM) können sowohl abbildend, also in zu einer Zielebene konjugierten Ebene, als auch holografisch eingesetzt werden. Die abbildende Anwendung ist oftmals Mittel der Wahl, da der Einsatz vergleichsweise einfach und mit hoher Abbildungsqualität realisiert werden kann. Allerdings sind die Möglichkeiten begrenzt. Beim Einsatz in nicht konjugierten Ebenen ergeben sich dagegen deutlich interessantere Varianten der Lichtbeeinflussung.

Nahezu alle Arten von kommerziell erhältlichen Modulatoren werden am ITO untersucht und stehen zur Verfügung und werden in sehr unterschiedlichen Anwendungen von der Astronomie bis zur Mikromanipulation in der Biomedizin eingesetzt.

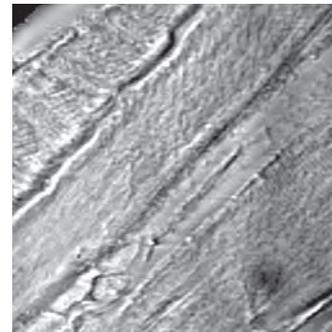
Der Schwerpunkt der Arbeiten basiert auf hochauflösenden phasenschiebenden Flüssigkristallmodulatoren, aber auch verschiedene MEMS-basierte Elemente, Membranspiegel, Electrowetting-Linsen, photorefraktive Kristalle sowie optisch-adressierte Modulatoren stehen zur Verfügung. Die Elemente werden dabei systematisch charakterisiert und in innovativen Anwendungen eingesetzt.

Die Forschergruppe hat ihren Ursprung in der analogoptischen Bildverarbeitung (Korrelation, Bildvorverarbeitung, Selbstfilterung). Aufgrund der extremen Fortschritte im Bereich der digitalelektronischen Rechentechnik sind Anwendungen hier seit einigen Jahren nur noch für spezielle Probleme sinnvoll. Ein Beispiel für eine sinnvolle analogoptische Vorverarbeitung ist die Abbildung von Phasenobjekten mittels Phasenkontrastverfahren, wie sie insbesondere im biomedizinischen Bereich üblich ist. SLMs können hier gewinnbringend eingesetzt werden indem die sonst üblichen statischen Phasenfilter durch frei programmierbare, an die jeweilige Aufgabenstellung anpassbare Filter ersetzt werden.

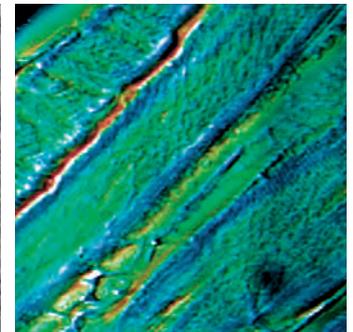
Abb. 1: Dynamischer Phasenkontrast



Zernike Phasenkontrast



DIC-Phasenkontrast

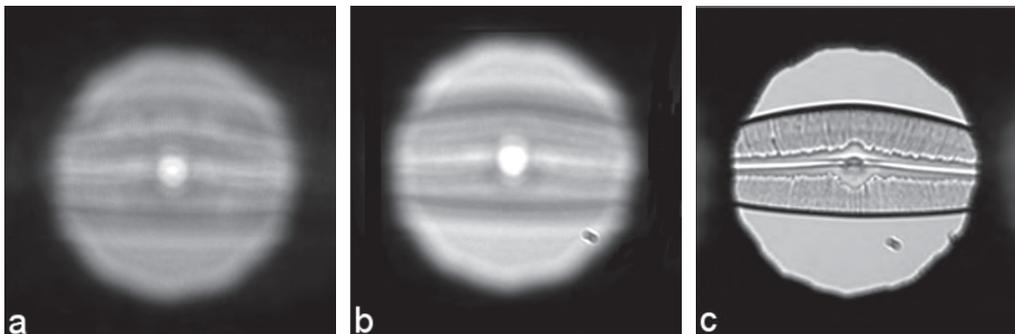


Digitale Kombination

Neben der Implementierung bekannter Filterverfahren (z.B. Zernike, Dunkelfeld, differentieller Interferenzkontrast, Spiralphasenkontrast) mit beliebiger Parametrisierung können auch gänzlich neue Verfahren realisiert werden. Noch weitreichender werden die Möglichkeiten indem verschiedene, in schneller Folge mit unterschiedlichen Filtern aufgenommene Bilder digital kombiniert werden. Die Mikroskopie profitiert von SLMs aber nicht nur bei der Abbildung von Phasenobjekten. Die holografische Mikromanipulation (vgl. S. 54) stellt inzwischen ein wichtiges Anwendungsfeld für Lichtmodulatoren in der Mikroskopie dar. Darüber hinaus sind Aberrationen in der Praxis oft ein Problem bei hochaperturigen Abbildungen. Dabei stehen nicht so sehr die durch das Mikroskop entstehenden Aberrationen im Vordergrund sondern die durch die Probe selbst entstehenden Bildfehler. Bereits kleine Änderungen der Brechzahl führen z. B. zu starker sphärischer Aberration und dicke Proben können sehr komplexe Aberrationen nach sich ziehen.

Der Ausgleich von Aberrationen durch den Einsatz von SLMs in der Pupillenebene ist an sich trivial wenn ein Phasenmodulator zur Verfügung steht. Hierzu muss aber zunächst die Aberration bekannt sein, d.h. In der Praxis gemessen werden. Ein wichtiges Aufgabengebiet stellt daher die Messung von Aberrationen unter Zuhilfenahme der Lichtmodulatoren selbst dar. Hierzu wurden verschiedene Methodiken im Lauf der Jahre entwickelt. Die Bildfolge der Abb. 2 zeigt die mit einem an das Shack-Hartmann Prinzip angelehnten Verfahren erzielte Korrektur für ein Diatom. Das Verfahren kommt dabei ohne zusätzliche Bauelemente aus und arbeitet mit ausgedehnten Objekten. Eine weitere interessante Abwandlung der Shack-Hartmann Sensorik stellt der adaptive Shack-Hartmann Sensor dar. Durch die Realisierung der Mikrolinsen mittels eines SLMs können viele praktische Probleme der Shack-Hartmann Sensorik (Schlechte Spotqualität bei stark deformierten Wellenfronten, konstante Empfindlichkeit und konstanter Messbereich, ungleichmäßige Ausleuchtung, Übersprechen der Einzelspots) auf elegante Weise iterativ gelöst werden.

Abb. 2: SLM-basierte Aberrationsmessung und Korrektur



Unkorrigierte (a) und korrigierte Aberrationen – (b) teilweise, (c) komplett – durch SLM-basierte Aberrationsmessung und Korrektur.

Aktuell werden in der Gruppe ebenfalls dynamische Hologramme in einem BMBF Verbundprojekt zur Realisierung neuartiger Multipoint-Vibrometer untersucht. Hierbei können traditionelle Scanningverfahren durch Mehrpunktmesssysteme ersetzt werden, um simultane Messungen an transienten Schwingungen mit hoher Dynamik und Genauigkeit durchzuführen.

Für viele der aktiv rückgekoppelten Verfahren, die in der Gruppe angewendet werden, stellen die digitale Bildverarbeitung sowie die Optimierung von Hologrammen wichtige Werkzeuge dar, um praktische Systeme zu realisieren. Insbesondere die schnelle Rechentechnik unter Einsatz von hochgradig parallel arbeitenden Grafikkarten ist von Bedeutung. Entsprechend werden diese Arbeitsfelder in der Gruppe ebenfalls intensiv bearbeitet.

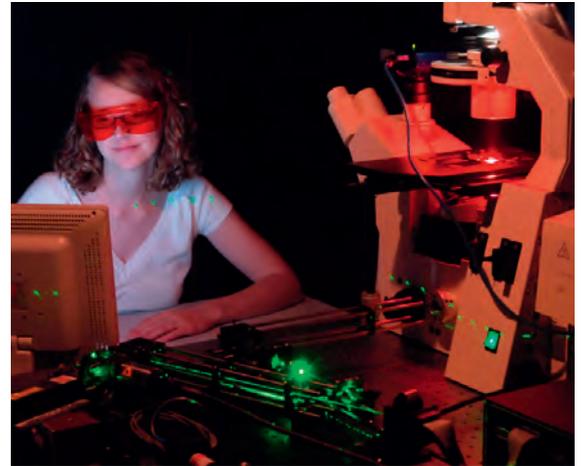


Abb. 3: Holografische Mikromanipulation

#### **Ausgewählte Publikationen:**

- [1] Reicherter, M.; Haist, T.; Wagemann, E.U.; Tiziani, H.J.: „ Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display“, *Optics Letters*, 1999 , 24 , 608-610
- [2] Kohler, C.; Haist, T.; Osten, W.: Model-free method for measuring the full Jones matrix of reflective liquid-crystal displays, *Optical Engineering*, 48(04), 044002 (2009)
- [3] Haist, T.; Haffner, J.; Osten, W.: Scene-based wavefront correction with spatial light modulators, *Proc. SPIE 7064*, 70640M, (2008)
- [4] Zwick, S.; Haist, T.; Miyamoto, Y.; He, L.; Warber, M.; Hermerschmidt, A.; Osten, W.: „Holographic twin traps“, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 11 (2009) 034011
- [5] The adaptive Shack-Hartmann sensor, Seifert, L.; Liesener, J.; Tiziani, H. J.: *Optics Communications* 216 (2003) p. 313-319
- [6] Reicherter, M.; Zwick, S.; Haist, T.; Kohler, C.; Osten, W.: „Fast digital hologram generation and adaptive force measurement in LCD based holographic tweezers“, *Applied Optics* 45(5), pp. 888-896 (2006)
- [7] Osten, W.; Kohler, C.; Liesener, J.: Evaluation and application of spatial light modulators for optical metrology, *Optica Pura y Aplicada* 38(2005)3, 71–81
- [8] Haist, T.; Zwick, S.; Warber, M.; Osten, W.: „Spatial Light Modulators – Versatile Tools for holography“, *Journal of Holography and Speckle* 3, pp.1-12 (2006)
- [9] Zwick, S.; Haist, T.; Warber, M.; Osten, W.: Dynamic holography using pixelated light modulators, *Applied Optics* 49, F47 (2010)
- [10] Kohler, C.; Haist, T.; Schwab, X.; Osten, W.: „Hologram optimization for SLM-based reconstruction with regard to polarization effects“, *Optics Express* 16, pp. 14853-14861 (2008)



## Hochauflösende Messtechnik und Simulation

**Ziel der Arbeitsgruppe HMS – „Hochauflösende Messtechnik und Simulation“ ist die Untersuchung und Entwicklung optischer Messverfahren, die eine hochpräzise Strukturvermessung im Subwellenlängenbereich erlauben. Dazu gehören sowohl die rigorosen Simulationen der eigentlichen Licht-Struktur-Wechselwirkung bis hin zur Modellierung des kompletten optischen Messprozesses, als auch die experimentelle Untersuchung neuer und bewährter Messverfahren, die neben der Intensität des Lichts insbesondere die Polarisation und die Phase als weitere Informationskanäle nutzen, um Strukturinformation höchster Genauigkeit zu erhalten.**

### ■ Mikroskopie und modellbasierte Rekonstruktion

Für die Metrologie werden in der Serienfertigung von Halbleiterstrukturen optische Messmethoden verwendet, auch wenn die Strukturdimensionen im Bereich der Wellenlänge des verwendeten Lichts oder sogar weit darunter liegen. Diese Methoden bieten eine hohe Messgeschwindigkeit bei einem relativ geringen technischen Aufwand und gewährleisten eine minimal-invasive Wechselwirkung mit der Oberfläche des Prüfobjekts. Ein Beispiel hierfür ist die Mikroskopie mit hochaperturigen Objektiven [1]. Dabei können allerdings die Strukturen durch die immer kleiner werdenden Dimensionen auch bei der Verwendung von kurzwelligem Licht nicht mehr vollständig aufgelöst und direkt aus dem Mikroskopbild rekonstruiert werden. Um dennoch zu einer Strukturinformation zu gelangen, wird das Verfahren der modellbasierten Rekonstruktion verwendet.

Dabei wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, dass in der Praxis meist nur eine geringe Anzahl von verschiedenen Struktur-Konfigurationen vorkommt. Durch diese Vorinformation und die Berücksichtigung der verschiedenen physikalisch-optischen Vorgänge innerhalb dieser Konfigurationen, wie z.B. Polarisierungseffekte (Abb. 1), Streufeldresonanzen oder materialabhängige Phasen-

sprünge, können dann die Strukturdimensionen durch einen Vergleich mit Simulationsrechnungen sehr genau bestimmt werden. Dies gelingt in der geforderten Präzision natürlich nur, wenn die erwähnten Effekte sowohl messtechnisch erfasst als auch durch die Simulation berücksichtigt werden können. Zur numerischen Berechnung der optischen Vorgänge wird ein präzises Modell der Struktur und des Messsystems erstellt und mit speziell am ITO entwickelten rigorosen Verfahren simuliert [2, 3], dem Programmpaket ITO-MICROSIM.

Im Ergebnis der Simulation liegt dann die vollständige Information über die Licht-Strukturwechselwirkung vor. Das ermöglicht dann die Nutzung aller Informationskanäle des elektromagnetischen Wellenfeldes wie Intensität, Phase, Polarisation und Winkelspektrum. Mit diesen Daten können dann geeignete Kombinationen messbarer Parameter, wie etwa der Phase, Polarisation oder Intensität, gefunden werden, die hochfrequente und somit hochauflösende Informationen auch im mikroskopischen Bild liefern können. Durch den Vergleich mit Messungen, die an den ausgewählten informationstragenden Parametern durchgeführt werden, ist dann die Rekonstruktion der Strukturdimensionen möglich [4].

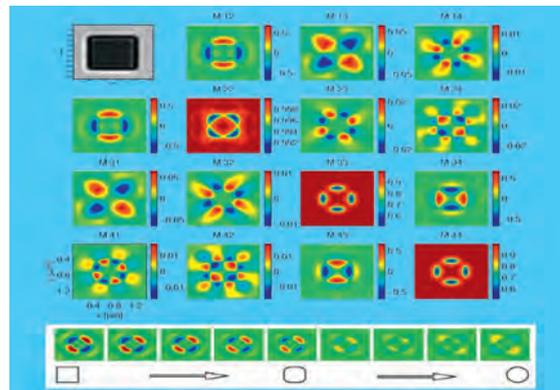


Abb. 1: DUV-Mikroskopie mit Müllermatrix-Signatur zur Formerkennung

## ■ Scatterometrie

Für zukünftige Technologie-Knoten in der Halbleiterfertigung bietet die Mikroskopie bedingt durch die kleinen Strukturgrößen und die Auflösungsbegrenzung zu wenig auswertbare Informationen über die Strukturdetails. Andererseits möchte man zur Prozesskontrolle die Vorteile einer preisgünstigen, schnellen, flächenhaften, berührungslosen und damit nicht-destruktiven Messmethode erhalten, was auch in Zukunft wohl nur durch optische Verfahren zu bewerkstelligen ist. Da die direkte Auswertung der evaneszenten Lichtmoden, die die hochauflösenden Informationen tragen, zur Zeit nur durch langsame Nahfeld-Rastermethoden möglich ist, muss man sich bei Fernfeldmessungen auf eine indirekte Beobachtung dieser Moden beschränken. Da die evaneszenten Felder nur in der unmittelbaren Umgebung der Strukturen eine messbare Feldstärke besitzen, diese aber dort wegen dem exponentiellen Verlauf recht groß ist, bestehen starke Wechselwirkungen zwischen dem Licht und den Materialien der Struktur.

Bedingt durch diese Wechselwirkung und die damit einhergehenden Energieverluste durch die Absorption oder Depolarisation der Strahlung wegen der strukturinduzierten Doppelbrechung, besitzt jeder Strukturtyp eine einzigartige Signatur in polarisationsaufgelösten Reflektionsmessungen, wenn die Beleuchtungs-Randbedingungen sorgfältig auf die Struktur abgestimmt sind. Durch den Vergleich dieser Signaturen mit einer Bibliothek aus vorab vermessenen Referenzstrukturen können so relevante Strukturparameter sehr genau bestimmt werden [5]. Für Messungen dieser Art wird häufig der Begriff Scatterometrie verwendet. Die Scatterometrie spielt in der Halbleiterfertigung wegen der erreichbaren Präzision eine große Rolle [6].

Für den Vergleich der gemessenen Daten mit den Referenzstrukturen stehen im Wesentlichen zwei Methoden zur Verfügung: die Messung bekannter Referenzstrukturen und die Simulation eines Satzes von Referenzmodellen

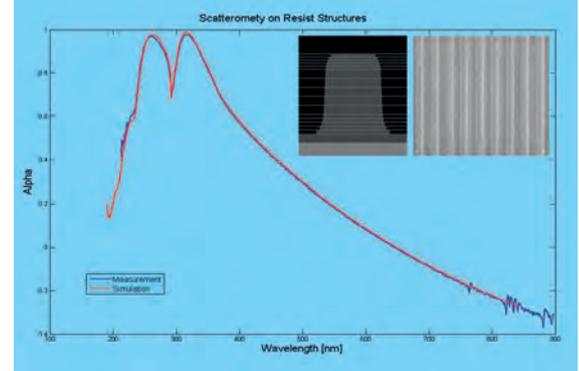


Abb. 2: Vergleich von Simulation und Messung von Scatterometriedaten eines Liniengitters

(Abbildung 2). Die erforderlichen Modellrechnungen sind trotz der enormen Rechenleistung moderner Workstations in Kombination mit den neuesten numerischen Verfahren immer noch keine triviale Standardaufgabe, die auf Knopfdruck erledigt werden könnte. Daher ist es notwendig, dass man zu Vereinfachungen in den Modellen kommt, die dann aber nicht zu einer Einbuße von Genauigkeit führen dürfen [7]. Man muss also speziell auf den Strukturtyp und den zu bestimmenden Strukturparametern zugeschnittene Rechenmodelle entwickeln, deren Funktionstüchtigkeit dann mit Hilfe von Messungen verifiziert wird.

## ■ Defektoskopie

Für die Prozesskontrolle in der Halbleiterindustrie ist neben den Strukturdimensionen einzelner ausgewählter Strukturen gerade auch die Feststellung vorhandener Defekte auf dem Wafer interessant. Aus der Kenntnis der Defektdichte, der Verteilung und den vorhandenen Defekttypen lassen sich Kompensationsmaßnahmen ableiten, die dann zu einer Steigerung der Ausbeute führen. Für solche Messaufgaben ist die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Methode der Scatterometrie ungeeignet, da sie für eine repräsentative Stichprobe eines gesamten Wafers zu langsam ist. Mit Hilfe der Defektoskopie [8] dagegen lässt sich sehr schnell eine Vielzahl an Strukturen gleichzeitig auf Defekte prüfen.

Ausgangspunkt dafür ist ein Mikroskopaufbau, der bei Nanostrukturen natürlich keine aufgelöste Abbildung der Strukturen mehr liefern kann. Von Vorteil ist allerdings, dass in der Praxis solche Defekte isoliert vorkommen, was bedeutet, dass in einer periodischen Anordnung von gleichen Strukturen an isolierten Stellen durch die Defekte andere optische Eigenschaften vorliegen. Unter bestimmten Beleuchtungsbedingungen wirken diese

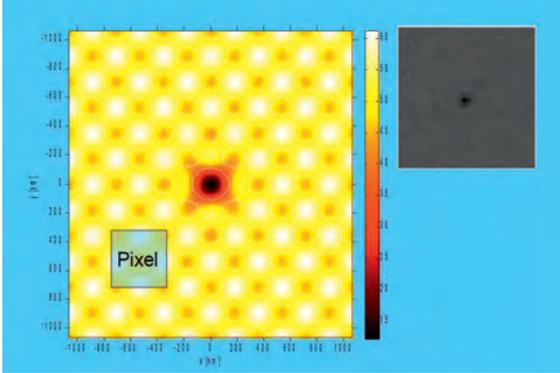


Abb. 3: Simuliertes Mikroskopbild eines Defekts in einem Kreuzgitter

Stellen dann als helle oder dunkle Punkte im Mikroskopbild, unabhängig davon wie groß die Strukturen oder die Defekte sind (Abbildung 3). Die Beleuchtungsbedingungen, bei denen das geschieht können dann als spezifische Signatur zur Unterscheidung verschiedener Defekte verwendet werden.

#### ■ Mehr Strukturinformation durch Weißlicht-Interferometrie

Die Weißlichtinterferometrie ist ein optisches, absolut messendes Verfahren mit einer hochpräzisen Tiefenauflösung. Sie ist zur Messung der Mikrostruktur technischer und biologischer Proben weit verbreitet, es lassen sich sowohl spiegelnde als auch raue Oberflächen erfassen. Die Grundidee hierbei ist, ein Interferenzmikroskop mit einer räumlich und zeitlich inkohärenten Lichtquelle zu betreiben und mit Hilfe einer Korrelation des Objekt- und Referenzstrahlenganges Informationen über die Phase und Intensität des Lichtwellenfeldes in einer bestimmten Fokusebene zu erlangen. Dabei sind durch die kurze Kohärenzlänge des Lichtes nur Interferenzeffekte sichtbar wenn die Weglängen im Objekt- und Referenzarm ungefähr gleich sind, was zu einer Hüllkurve des Korrelogramms mit einem ausgeprägten Maximum führt und somit die eindeutige Zuordnung der Streifenordnung erlaubt. Diese Zuordnung bietet die Möglichkeit Oberflächenprofile zu erstellen sogar wenn das Korrelogramm durch eine raue Oberfläche gestört ist.

Bisher konnte mit diesen Methoden eine Tiefeninformation nur bei Strukturen bestimmt werden, die sich im Mikroskop auflösen lassen. Analog zur Scatterometrie lässt sich nun auch die Weißlichtinterferometrie so erweitern, dass mit Hilfe von Simulationen Strukturdaten weit unterhalb der Auflösungsgrenze geliefert werden können. Abbildung 4 zeigt schematisch das Messprinzip. Ein Pin-

hole mit variablem Durchmesser wird mit einer möglichst inkohärenten Hellfeldbeleuchtung beleuchtet und wirkt als Kohärenzblende. Es wird über eine Kollektorlinse und das Mikroskopobjektiv auf die Probe abgebildet. Für jede ebene Welle, die das Pinhole beleuchtet, ergibt sich eine in sich kohärente Sub-Apertur in der Pupille des Mikroskopobjektivs. Über den Pinhole-Durchmesser kann also die räumliche Kohärenzlänge der Probenbeleuchtung eingestellt werden. Diese Kohärenzlänge sorgt genau dafür, dass nicht alle in einer Sub-Apertur enthaltenen Beleuchtungsrichtungen unabhängig voneinander untersucht werden können. Je kleiner fokussiert werden muss, umso größer ist die kohärente Subapertur und umso geringer die Winkelauflösung.

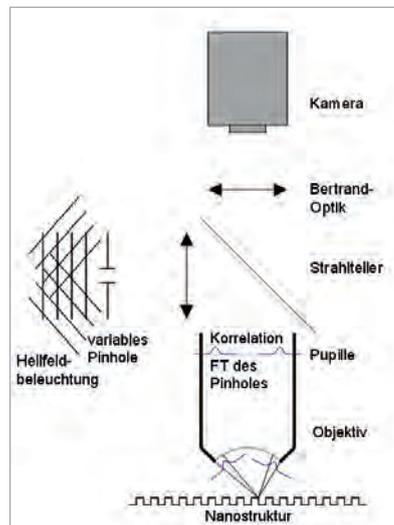
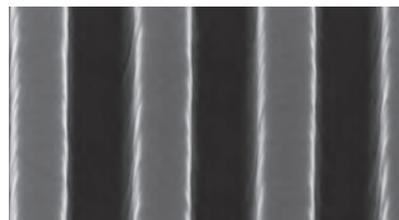


Abb. 4:  
Weißlicht Fourier-  
Scatterometrie

### ■ Line-Edge Roughness (LER)

Die Kantenrauheit ist ein wichtiger Prozessparameter in der Halbleiterherstellung. Es ist zu erwarten, dass dieser Parameter immer wichtiger wird, da bei schrumpfenden Strukturgrößen die relative Größe dieser Schwankungen überproportional zunehmen wird. Die gezielte Herstellung von Kanten mit einer definierten Rauheit ist extrem schwierig, da diese Variation der Kantendimensionen ja in der Größenordnung der bei der Herstellung unvermeidlichen, „ungewollten“ Rauheit liegt. Deshalb kommt der theoretischen Untersuchung mit Hilfe von Computersimulationen hier eine besondere Bedeutung zu. In der Arbeitsgruppe wurde so untersucht inwieweit die Anwesenheit von LER einen störenden Einfluss auf die scatterometrischen Messungen besitzt und wie die Modelle gewählt werden müssen um diesen Einfluss zu minimieren. Weiterhin ist es wünschenswert die LER-Parameter selbst durch ein geeignetes Scatterometrie-

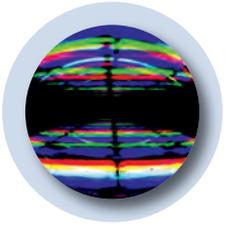
Modell bestimmen zu können. Die Modellierung einer zufällig fluktuierenden Kante ist nicht ganz einfach. Es zeigt sich, dass man für numerisch stabile Ergebnisse einen sehr großen Bereich der Linie modellieren muss, obwohl die Korrelationslänge der betrachteten Rauheit nur etwa 100 nm beträgt. Durch den Einsatz von modernen Fieldstitching-Methoden lassen sich solch große Simulationsbereiche trotzdem in der gewünschten hohen Genauigkeit handhaben. Dennoch stößt man bei solchen Rechnungen leicht an die Grenze des Machbaren.



Kantenrauheit

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Totzeck, M.: „Numerical simulation of high-NA quantitative polarization microscopy and corresponding near-fields“, *Optik* 112 (2001) No. 9, 399-406
- [2] Schuster, T.; Ruoff, J.; Kerwien, N.; Rafler, S.; Osten, W.: „Normal vector method for convergence improvement using the RCWA for crossed gratings“, *JOSA A*, Vol. 24, Issue 9, pp. 2880-2890 (2007)
- [3] Götz, P.; Schuster, T.; Frenner, K.; Rafler, S.; Osten, W.: „Normal vector method for the RCWA with automated vector field generation“, *Optics Express*, Vol. 16, Issue 22, pp. 17295-17301 (2008)
- [4] Frenner, K.; Schuster, T.; Rafler, S.; Osten, W.: „Model Based Optical Metrology for Micro- and Nanostructures“, *Micromaterials and Nanomaterials*, issue 8 (2008), Berlin, 2008.
- [5] Schuster, T.; Rafler, S.; Frenner, K.; Osten, W.: „Influence of line edge roughness (LER) on angular resolved and on spectroscopic scatterometry“, *Proc. SPIE*, Vol. 7155, 71550W (2008); doi:10.1117/12.814532
- [6] Osten, W.; Ferreras Paz, V.; Frenner, K.; Schuster, T.; Bloess, H.: „Simulations of Scatterometry Down to 22 nm Structure Sizes and Beyond with Special Emphasis on LER“, *FRONTIERS OF CHARACTERIZATION AND METROLOGY FOR NANOELECTRONICS: 2009 American Institute of Physics* 978-0-7354-0712-1/09
- [7] Kerwien, N.; Schuster, T.; Rafler, S.; Osten, W.; Totzeck, M.: „Vectorial thin-element approximation: a semirigorous determination of Kirchhoff's boundary conditions“, *J. Opt. Soc. Am. A* 24, 1074-1084 (2007)
- [8] Rafler, S.; Petschow, M.; Seifert, U.; Frenner, K.; Göckeritz, J.; Osten, W.: „Effects of pupil discretization and Littrow illumination in the simulation of bright-field defect detection“, *Optics Letters*, Vol. 34, Issue 12, pp. 1840-1842 (2009)



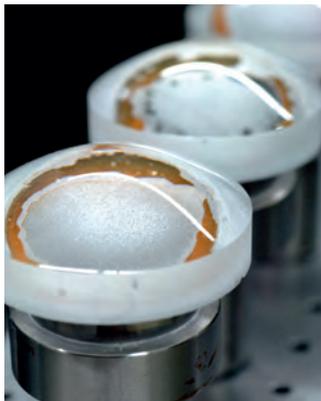
## Interferometrie und Diffraktive Optik

**Das Ziel der Forschungsarbeiten ist die Untersuchung neuer Messkonzepte durch den Einsatz von diffraktiven Optiken. Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der interferometrischen Formprüfung optischer Flächen, insbesondere von Asphären und Freiformflächen, in Design und Simulation abbildender refraktiv-/diffraktiver Hybridoptiken sowie in der Weiterentwicklung der Herstellungstechnologie diffraktiver Optiken.**

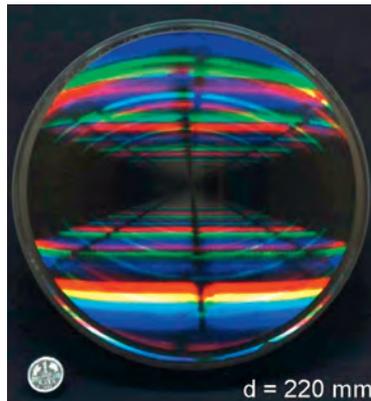
Moderne optische Systeme verdanken ihre Leistungsfähigkeit der Entwicklung neuer Materialien und Fertigungstechnologien, die ihrerseits wieder neue Designansätze ermöglichen. Umgekehrt erfordern innovative Lösungsansätze oftmals die Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Technologien. In diesem Spannungsfeld bewegt sich auch die computergenerierte Holografie, deren Anfänge im Bereich der optischen Datenverarbeitung in den 1960er Jahren liegen. Inzwischen werden computergenerierte Hologramme oder generell

diffraktive Optiken in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt: von der Strahlformung über die Polarisationsformung bis hin zu abbildenden Systemen. Am Institut für Technische Optik wird der Einsatz diffraktiver Optiken für messtechnische Anwendungen erforscht.

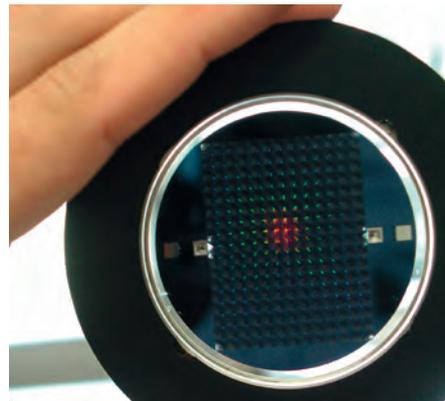
Ein wichtiger Bereich hierbei ist die Asphärenmesstechnik. Bereits 1971 wurden von MacGovern und Wyant computergenerierte Hologramme (CGH) zur Generierung von asphärischen Wellenfronten für die Vermessung von Asphären vorgeschlagen. Das Ziel der Asphärenmesstechnik ist es, die Form polierter Linsen- oder Spiegeloberflächen hochgenau, mit Genauigkeitsanforderungen bis in den Nanometerbereich zu vermessen. Die Schwierigkeit dabei ist, dass die Sollform sehr stark von der vergleichsweise einfach zu vermessenden Kugelform abweichen kann und daher entweder diese Soll-Abweichung mitgemessen oder durch eine sogenannte Nulloptik kompensiert werden muss. Beide Ansätze haben ihre jeweiligen Vorteile und sind Gegenstand aktueller Forschung am Institut [1][2][3].



Asphärische Prüflinge



Diffraktiver, asphärischer Spiegel zur Kalibrierung eines Nulltestsystems



Diffraktives Punktlichtquellenarray für interferometrische Anwendungen

Die einzigartigen Möglichkeiten diffraktiver Optiken beschränken sich nicht auf Anwendungen in der Interferometrie. In aktuellen Projekten entwickeln wir zum Beispiel auf Basis von diffraktiven Maßverkörperungen kompakte und kosteneffiziente Drehwinkelmesssysteme [4].



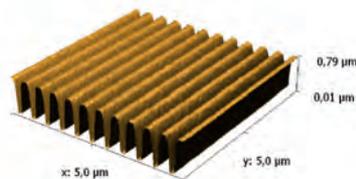
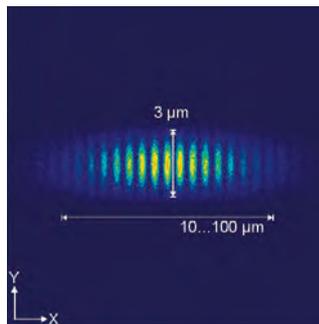
*Inkrementelles Drehwinkelmesssystem mit diffraktiver Maßspur auf Basis von DVD-Herstellungstechnologie.*

Interessant für Anwendungen in abbildenden Optiksyste men ist die starke negative Dispersion, also die wellenlängenabhängige Brechkraft, die sich bei diffraktiven Linsen genau umgekehrt verhält wie die von optischen Gläsern. Damit können Farbfehler von Systemen effektiv korrigiert werden, auch in Spektralbereichen, in denen nur wenige optische Gläser mit akzeptabler Transparenz für die Farbkorrektur zur Verfügung stehen. Mit den am Institut vorhandenen Laserschreibtechnologien mit anschließenden Ätz- oder Abscheideverfahren wurden in vergangenen und aktuellen Projekten effiziente diffraktive Elemente in Graustufentechnologie für die verschiedensten Spektralbereiche entworfen und gefertigt, vom Mittleren Infrarot bei 10  $\mu\text{m}$  Wellenlänge bis ins tiefe UV bei 193 nm.

Voraussetzung für die Realisierung diffraktiver Optiken ist die stetige Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie hinsichtlich Effizienz und Präzision des Schreibprozesses sowie der Flexibilität bei den Strukturierungsmöglichkeiten. Die Erweiterung der Fertigung auf gekrümmte Oberflächen [5] und die Inbetriebnahme unseres REM/FIB-Zweistrahler-Rasterelektronenmikroskops (FIB = focussed ion beam), mit dem Strukturen im einstelligen Nanometermaßstab erzeugt werden können, stellen hier wichtige Meilensteine dar.

Ein effizientes Design mit diffraktiven Optiken muss die spezifischen Eigenschaften diffraktiver Optiken, wie die Entstehung unerwünschter Beugungsordnungen, berücksichtigen. Wellenoptische Simulationsansätze leisten dies, stoßen jedoch trotz der steigenden Leistungsfähigkeit aktueller Rechner an ihre Grenzen. Dies gilt in noch höherem Maße für sehr kleine Strukturen, die noch rechenintensivere, sogenannte rigorose Simulationsmethoden erfordern. Aktuelle Forschungsarbeiten widmen sich daher auch der effizienten Simulation und Integration diffraktiver Elemente in die verwendeten Design-Tools [6].

Der Polarisationszustand ist eine grundlegende Eigenschaft von Licht, deren Bedeutung mit der Entwicklung hochauflösender Messtechniken und neuer Lasermaterialbearbeitungstechnologien zunimmt. Auch hier können diffraktive Optiken gewinnbringend eingesetzt werden, beispielsweise zur Generierung von radial polarisiertem Licht, das einen effizienteren Einsatz von Laserlicht in der Lasermaterialbearbeitung ermöglicht. Am Institut wurden hierfür erfolgreich zirkulare sub-lambda-Gitterstrukturen hergestellt, die im Laserresonator radial polarisiertes Licht selektieren [7]. Hierfür wurde eine neuartige Laserschreibtechnologie implementiert, die sogenannte scannende Interferenzlithographie [8].



Oben: Schreibspot bei der Scannenden Interferenzlithographie. Mit einem solchen Zweistrahl-Interferenzmuster können sehr effizient hochfrequente Ringgitterstrukturen (unten: 445 nm Gitterperiode) hergestellt werden.

Auch im mikrooptischen Bereich ist die Manipulation des Polarisationszustandes von Bedeutung. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms „1337: Aktive Mikrooptiken“ der DFG werden aktive polarisationsformende Mikrooptiken untersucht. Diese optisch angesteuerten Mikrooptiken sollen zukünftig rekonfigurierbar die Polarisation des zu steuernden Laserstrahls räumlich aufgelöst ändern können [9]. Damit werden sich neue Möglichkeiten im Bereich der Messtechnik und der Strahlformung ergeben.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Pruss, C.; Reichelt, S.; Tiziani, H.J.; Osten, W.: „Computer-generated holograms in interferometric testing“, *Opt. Eng.*, vol. 43, 2004, pp. 2534-2540.
- [2] Garbusi, E.; Pruss, C.; Osten, W.: „Interferometer for precise and flexible asphere testing“, *Optics Letters*, vol. 33, 2008, pp. 2973-2975.
- [3] Garbusi, E.; Osten, W.: „Perturbation methods in optics : application to the interferometric measurement of surfaces“, *America*, vol. 26, 2009, pp. 2538-2549.
- [4] Hopp, D.; Pruss, C.; Osten, W.; Seybold, J.; Mayer, V.; Kück, H.: „Optischer inkrementaler Drehgeber in Low-Cost-Bauweise“, *tm – Technisches Messen*, vol. 77, 2010, pp. 358-363.
- [5] Reichle, R.; Häfner, M.; Pruss, C.; Osten, W.: „Diffraktive Strukturen auf gekrümmten Oberflächen für hybride Abbildungssysteme“, *Photonik*, 4, 2010, pp. 36-40.
- [6] Pruss, C.; Reichle, R.; Osten, W.: „Realistic modeling of diffractive optical elements“, *EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2010*, ISBN 978-3-00-024193-2, Koli, Finland: 2010, p. 2444.
- [7] Häfner, M.; Pruss, C.; Osten, W.; Abdou-Ahmed, M.; Vogel, M.M.; Voß, A.; Graf, T.: „Interferenzlithografische Herstellung von rotationssymmetrischen Sub-Lambda-Gitterstrukturen“, *DGaO Proceedings*, 109. Tagung, <http://www.dgao-proceedings.de> ISSN: 1614-8436, 2008.
- [8] Häfner, M.; Reichle, R.; Pruss, C.; Osten, W.: „Laser direct writing of high resolution structures on curved substrates: evaluation of the writing precision“, in: W. Osten, M. Kujawinska, *Fringe 2009*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [9] Schaal, F.; Pruss, C.; Osten, W.: „Active spatial polarization control induced by diffractive optical illumination“, *EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2010*, ISBN 978-3-00-024193-2, Koli, Finland: 2010, p. 2455.



## Kohärente Messtechnik

**Ziel der Forschungsarbeiten ist die Untersuchung und Anwendung von Methoden der Kohärenten Messtechnik zur Erfassung von 3D-Koordinaten, 3D-Verschiebungen und orts aufgelösten Materialeigenschaften technischer und biologischer Objekte.**

Seit den achtziger Jahren werden am ITO interferometrische Verfahren zur Erfassung von statischen und dynamischen Verformungen sowie zur Abstandsmessung entwickelt und zur Untersuchung von mechanischen Bauteilen sowie biologischen Geweben verwendet. Zu den ersten Verfahren in diesem Bereich gehört die Schwingungsmessung an rotierenden Reifen, wo die holographische Interferometrie eingesetzt wurde. Die interferometrische Messtechnik hat sich im Laufe der neunziger Jahre schnell entwickelt. Dank der Verfügbarkeit von neuen Aufnahme Medien und Rechnern, die es erlauben, Interferogramme (Hologramme) schnell zu registrieren und digital zu verarbeiten. Es konnten insbesondere Prinzipien der digitalen Holographie entwickelt und für verschiedene Anwendungen im makroskopischen und mikroskopischen Bereich implementiert werden.

In den letzten Jahren haben sich die Forschungsarbeiten auf folgende Schwerpunkte konzentriert:

### ■ UV digitale holographische Mikroskopie

Für die Untersuchung von 3D-Mikrostrukturen werden immer höhere Ortsauflösungen verlangt. Dies gilt sowohl für technische als auch für biologische Mikrostrukturen und führt in der augenblicklichen Entwicklung der optischen Metrologie zu immer kürzeren Wellenlängen. Es wurde eine hochauflösende Messtechnik bei einer Wellenlänge von 193 nm entwickelt, die mit einer minimalen Anzahl einfacher optischer Standardkomponen-

ten auskommt. Dabei wird bewusst auf hoch korrigierte und damit sehr teure DUV-Optik verzichtet. Das hohe physikalische Auflösungsvermögen wird mit Hilfe von Konzepten, basierend auf den Prinzipien der digitalen Holografie erreicht. Mit Hilfe dieser Technik wurden Strukturen von 200 nm aufgelöst.

### ■ Vergleichende digitale Holographie

Diese Technik macht sich bewusst die Technologie moderner räumlicher Lichtmodulatoren (LCD, LCOS) zunutze. Indem das zuvor aufgezeichnete digitale Hologramm des Musterobjekts (auch bezeichnet als kohärente Maske) in einen geeigneten Lichtmodulator eingeschrieben wird, ergibt sich die Möglichkeit, die konjugierte Welle aktiv zu rekonstruieren, um damit das Testobjekt kohärent zu beleuchten. Die Interferenzphase des schließlich rekonstruierten digitalen Hologramms des Testobjekts verkörpert lediglich die Form- bzw. Verformungsdifferenz zwischen Muster- und Testobjekt. Auf diese Weise lassen sich in Prozess-Echtzeit Inspektionsergebnisse und Qualitätsaussagen auch an komplexen Prüfobjekten erzielen.

### ■ Untersuchung der elastisch-plastischen Eigenschaften von Knochengewebe

Die holographische Interferometrie erlaubt, die elastischen Eigenschaften des Knochens in sehr kleinen Bereichen (etwa  $400 \times 200 \mu\text{m}^2$ ) genau zu bestimmen und die Veränderungen der elastischen Module in unterschiedlichen Bereichen zu visualisieren. Während der Messung sind die Proben in Wasser eingebettet (dies ist für das Studium der biologischen Proben wesentlich) und werden gedehnt, bzw. gestaucht. Wir haben darüber hinaus neue Methoden für die Visualisierung von Mikrorissen und Versagensbrüchen des Knochens unter Verwendung einer schnellen holographischen Messtechnik entwickelt.

### ■ Messung von Mikrosystemen

In den letzten Jahren sind eine Reihe von Messverfahren entwickelt worden, die geeignet sind, ortsauflösende mechanische Kenngrößen, wie Verformungs-, Verschiebungs- und Amplitudenfelder von Mikrostrukturen zu erfassen. Ein Defizit besteht darin, dass rückführbare Messwerte unter Verwendung geeigneter Kalibrierverfahren für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Mikrokomponenten noch nicht zur Verfügung stehen. Das Ziel eines gemeinsamen Projektes zwischen dem IMTEK-MML (Uni Freiburg) und dem ITO ist es, diese Lücke zu schließen und neue Strategien zu erforschen, die eine fertigungsnahe Kalibrierung sowie Bewertung der Messdaten ermöglichen und auf unterschiedliche Messmethoden anwendbar sind. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden mikromechanische Prüfnormale entwickelt, modellgestützte Kalibriervorschriften und Bewertungsverfahren erstellt und Richtlinien für deren künftige Anwendung in der Fertigung erarbeitet.

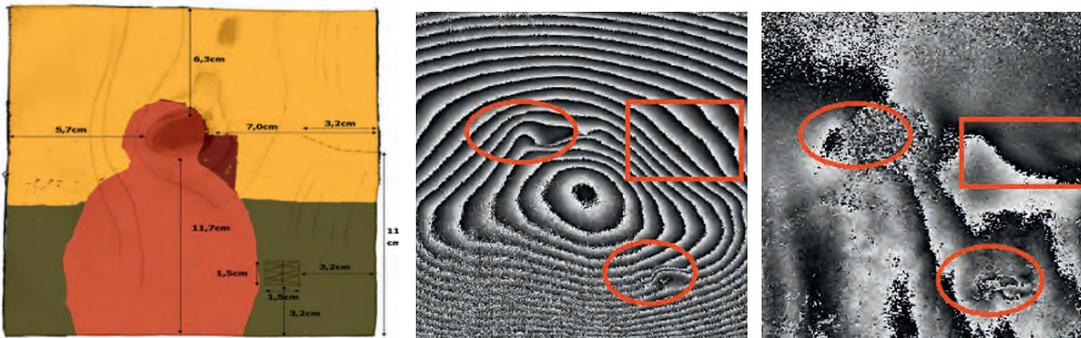
### ■ Endoskopie

Endoskopische Untersuchungen gewinnen sowohl im Maschinenbau, der Fein- und Mikrotechnik als auch in

verschiedenen Bereichen der Medizin zunehmend an Bedeutung. Viel versprechende Anwendungen sind u.a. in der zerstörungsfreien Prüfung von Innenräumen technischer Komponenten zu finden, die sich einer konventionellen Beobachtung entziehen. Die Ermittlung geometrischer Eigenschaften an schwer zugänglichen Stellen ist insbesondere im Verkehrsmittelbau von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Durch die Kombination von Endoskopie und digitaler holographischer Interferometrie lassen sich zusätzlich festkörpermechanische Daten wie Dehnungsfelder und Materialparameter gewinnen, so dass sich das Anwendungsgebiet klassischer endoskopischer Prinzipien deutlich erweitert.

### ■ Untersuchung von Kunstobjekten

Ein sehr attraktives Anwendungsfeld eröffnet sich für optische Messtechniken im Bereich der Inspektion von Kunstwerken. Mit Hilfe von Verfahren, basierend auf Shearographie und Speckle Interferometrie, werden Defekte unter der Oberfläche von Kunstwerken identifiziert. Die Methode erlaubt ebenfalls die Quantifizierung von Schäden, die durch Kunsttransporte erfolgen und gibt dem Restaurator wichtige Hinweise über den Zustand des Kunstwerks.



Ikone mit drei Defekten. Von links: Fotografie, Specklegramm und Shearogramm

### ■ Phase retrieval

Es wurden Methoden untersucht, die es erlauben, Phase und Amplitude einer Wellenfront aus einer gemessenen Intensitätsverteilung zu rekonstruieren. Der experimentelle Aufbau hat eine minimale Anzahl optischer Komponenten. Dabei wird bewusst auf eine Referenzwelle (Holografie) verzichtet. Mikroskopische Objekte (reflektiv oder transmittiv) werden mit kohärentem Licht beleuchtet, die erzeugten Intensitätsverteilungen werden durch einen Sensor registriert (CCD oder CMOS), gespeichert und durch Computeralgorithmen ausgewertet, um die Phase zu bestimmen.

### ■ Virtuelle Labore

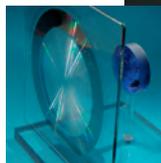
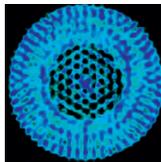
Ein virtuelles Labor „Digitale Holographie“ wird entwickelt und soll dazu dienen, reelle Experimente fernzusteuern und zu simulieren. Der Benutzer des virtuellen Labors hat die Möglichkeit, 3D Objekte mit verschiedenen Größen und verschiedener Komplexität (z. B. Objekte mit Nanostrukturen) auszuwählen, zu untersuchen und zu visualisieren.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Pedrini, G.; Tiziani, H.J.: *Double-Pulse Electronic Speckle Interferometry for Vibration Analysis*, *Applied Optics*, 33, 7857-7863 (1994)
- [2] Pedrini, G.; Tiziani, H.J.: *Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system*, *Applied Optics*, 41, 4489-4496 (2002)
- [3] Osten, W.; Baumbach, T.; Jüptner, W.: *Comparative digital holography*, *Optics Letters*, 27(20), 1764-1766 (2002)
- [4] Kolenovic, E.; Osten, W.; Klattenhoff, R.: et al. *Miniaturized Digital Holography Sensor for Distal Three-Dimensional Endoscopy*, *Applied Optics*, 42(25), 5167-5172 (2003)
- [5] Pedrini, G.; Osten, W.; Zhang, Y.: *Wave-front reconstruction from a sequence of interferograms recorded at different planes*, *OPTICS LETTERS*, 30, 833-835 (2005)
- [6] Baumbach, T.; Osten, W.; von Kopylow, C.; Jüptner, W.: *Remote metrology by comparative digital holography*, *Applied Optics*, 45(5), 925-934 (2006)
- [7] Kohler, C.; Schwab, X.; Osten, W.: *Optimally tuned spatial light modulators for digital holography*, *Applied Optics*, 45(5), 960-967 (2006)
- [8] Zhang, F.C.; Pedrini, G.; Osten, W.: *Phase retrieval of arbitrary complex-valued fields through aperture-plane modulation*, *PHYSICAL REVIEW A* 75 Issue: 4 Article Number: 043805 (2007)
- [9] Gopinathan, U.; Pedrini, G.; Osten, W.: *Coherence effects in digital in-line holographic microscopy*, *JOSA A* 25 2459-2466 (2008)
- [10] Situ, G.; Pedrini, G.; Osten, W.: *Spiral phase filtering and orientation-selective edge detection/enhancement*, *JOSA A* 26, 1788-1797 (2009)
- [11] Faridian, A.; Hopp, D.; Pedrini, G.; Eigenthaler, U.; Hirscher, M.; Osten, W.: *Nanoscale imaging using deep ultraviolet digital holographic microscopy*, *Optics Express* Vol. 18, Iss. 13, 14159-14164 (2010)

## 4.2 Ausgewählte aktuelle Forschungs-Schwerpunkte

Die 50jährige Geschichte des Instituts für Technische Optik zeigt, dass sich seine Mitglieder dem Prinzip „Kontinuität und Erneuerung“ in hohem Maße verpflichtet fühlen. Dieses Prinzip bedeutet, dass sowohl tragfähige Forschungslinien weitergeführt und systematisch ausgebaut werden als auch eigenständige sowie dem internationalen Trend folgende Innovationen aufgegriffen und in die Forschungsstrategie des Instituts integriert werden. Die im Fortgang ausführlicher dargestellten Projekte sind eine Auswahl von aktuell am Institut bearbeiteten und perspektivisch weiter verfolgten Forschungsthemen.



## Multiskalige Messtechnik und Sensorfusion

**Bei der Inspektion von kleinsten Defekten auf ausgedehnten Strukturen ergibt sich wegen der eingeschränkten Volumenmessrate einzelner Messsysteme stets ein Spannungsfeld zwischen Messdauer, Messauflösung und Messfeldgröße. Dieser Konflikt kann durch den Einsatz hierarchisch verknüpfter Multisensorsysteme mit flexibler Abfolge der Einzelmessungen signifikant entspannt werden.**

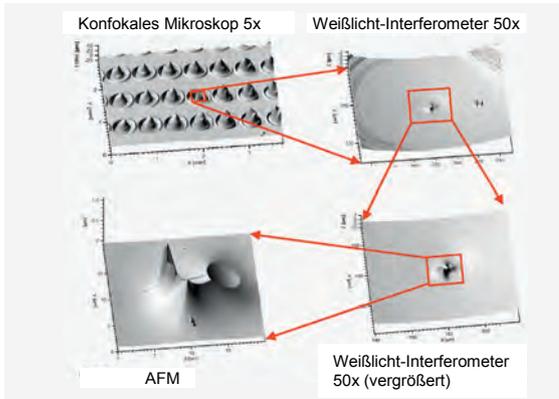
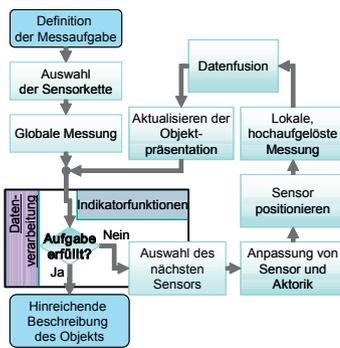
Um in der Qualitätssicherung eine hohe Prüfdichte anhand objektiver Kriterien zu gewährleisten, müssen Inspektionsvorgänge möglichst vollständig automatisiert werden. Optische Methoden verfügen hier aufgrund ihres berührungslosen und zerstörungsfreien Wirkprinzips sowie infolge der schnellen und flächenhaften „Antastung“ des Messobjekts über ein Potenzial, das sie für die Lösung einer Vielzahl von komplexen Inspektionsproblemen geradezu prädestiniert. Allerdings stehen diesem Anspruch eine Reihe von verfahrensbedingten Schwierigkeiten entgegen, die insbesondere aus dem begrenzten lateralen Auflösungsvermögen optischer bildgebender Systeme resultieren. Neue Strategien sind daher vor allem dort gefragt, wo die Dimensionen des Prüfbjektivs und des zu erkennenden Merkmals deutlich auseinandergehen. Man spricht hier von der flächenbezogenen Auflösung, die aufgrund des Beugungsproblems, des begrenzten Orts-Bandbreite-Produkts der vorhandenen Detektoren und der Aberrationen des Abbildungssystems limitiert ist.

Eine Lösung für dieses Problem stellen verschiedene Konzepte der Sensor-Fusion dar. Der am ITO verfolgte Ansatz beruht auf der systematischen und sequentiellen Verknüpfung unterschiedlicher Sensorprinzipien, die in verschiedenen Skalen relevante Informationen über das Prüfbjektiv erfassen und an nachfolgende Messprozesse weitergeben. Das Konzept der Automatischen Multiskaligen Mess- und Prüfstrategie (AMMS)

folgt einer Strategie, bei der Objektdateien durch den ereignisgesteuerten Einsatz von Sensoren nur in jenen Objektbereichen mit höherer Auflösung erfasst werden, in denen Hinweise auf mögliche Abweichungen von der Spezifikation über sogenannte Indikatoren in einer geringer aufgelösten Skala gewonnen wurden. Somit wird die effektiv notwendige flächenbezogene Auflösung systematisch reduziert.

Die Grundlagen zur Strategie wurden bereits im BMBF-Projekt GLATOM untersucht [1-2]. Im Zuge des DFG-Projektes OS 111-18 im Schwerpunktprogramm 1159 „StraMNano“ wurden diese Grundlagen in Kooperation mit dem Institut für Systemdynamik (ISYS) und dem Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) weiterentwickelt und in das AMMS-Konzept überführt. Das AMMS-Konzept wurde in einen Demonstrator zur automatischen Inspektion von Mikrolinsen-Arrays und mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS) [3] integriert. Um multiskalige Inspektionsaufgaben durchführen zu können, ist der Demonstrator mit einer Megapixel-Farbkamera mit telezentrischer Optik, einem konfokalen Mikroskop und einem schnellen und hochauflösenden chromatisch-konfokalen Punktsensor ausgerüstet. Innerhalb des Projektes konnte mit Hilfe des Demonstrators gezeigt werden, dass sich die multiskalige Strategie zur flexiblen Kontrolle von ausgedehnten Objekten eignet. Zukünftige Forschungsarbeiten zielen auf die Überführung der Strategie auf technische Oberflächen im mesoskopischen Bereich mit deutlich höherer Komplexität gegenüber Mikrolinsen-Arrays und auf die Implementierung einer interaktiven Nutzerführung zur Definition der problemspezifischen Ablaufsteuerung.

Die Forschungsschwerpunkte am ITO im Bereich multiskaliger Messtechnik liegen auf der generellen Strategieentwicklung, der Sensorverknüpfung auf Basis von



Automatische multiskalige Mess- und Prüfstrategie und Messung einer Mikrolinse mit Weißlichtinterferenz- und Rasterkraftmikroskop (AFM)



AMMS-Demonstrator für die Inspektion von Mikrolinsen-Arrays und MEMS

Defektindikatoren und der Sensorenklassifizierung und -modellierung. Die Untersuchung des Übertragungsverhaltens der einzelnen Komponenten stellt dabei einen Kernpunkt der Strategie dar, weil die Einzelkomponenten nur dann automatisiert verknüpft werden können, wenn deren Randbedingungen bekannt sind. Die Forschung zur Sensorklassifizierung ist aktuell auf die konfokale Mikroskopie fokussiert. Es wurde ein Modell entwickelt, das die Parametrisierung der Sensoren in Abhängigkeit der lokalen Oberflächenform und der Messunsicherheit an optischen Prüfböjekten ermöglicht [4]. Dieses Modell soll auf technische Oberflächen erweitert werden. Außerdem wird an der Charakterisierung hybrider Sensoren, wie der chromatisch-konfokalen Spektralinterferometrie, gearbeitet, um diese ebenfalls in den multiskaligen Messablauf zu integrieren. Um die Grundkonfiguration der Inspektionssysteme zu automatisieren und die Sensoren flexibel während der Inspektion anpassen zu können, wird am ITO an einem

Assistenzsystem zur Offline-Sensorplanung geforscht [5]. Ein Schwerpunkt für zukünftige Arbeiten ist die Weiterentwicklung des Assistenzsystems und dessen Integration in die Ablaufsteuerung des Demonstrators als Echtzeitmodul zur Auswahl und Neuparametrisierung von Sensoren.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Osten, W.; Andrä, P.; Kayser, D.: „Hochauflösende Vermessung ausgedehnter Oberflächen mit skalierbarer Topometrie (Highly-resolved measurement of extended technical surfaces with scalable topometry)“, *tm, Technisches Messen*, Vol. 66, pp. 413-428, 1999.
- [2] Kayser, D.; Bothe, Th.; Osten, W.: „Scaled topometry in a multisensor approach“, *Optical Engineering* 43, pp. 2469-2477, 2004.
- [3] Lyda, W.; Burla, A.; Haist, T.; Zimmermann, J.; Osten, W.; Sawodny, O.: „Automated Multi-Scale Measurement System for MEMS-Characterisation“, *Proc. SPIE*, Vol. 7718, 77180G, 2010.
- [4] Lyda, W.; Zimmermann, J.; Burla, A.; Regin, J.; Osten, W.; Sawodny, O.; Westkämper, E.: „Sensor and Actuator Conditioning for Multi-Scale Measurement Systems on example of confocal microscopy“, *Proc. SPIE*, Vol. 7389-02, 2009.
- [5] Burla, A.; Haist, T.; Lyda, W.; Osten, W.: „An assistance system for the selection of sensors in multi-scale measurement systems“, *Proc. SPIE, San Diego, USA, to be published 2010.*

## Prozess- und werkzeugintegrierbare Sensorik

**Für eine vollständige Überwachung der Fertigung ist es notwendig, dass qualitätsrelevante Daten so früh wie möglich aus dem Fertigungsprozess an die Steuerungs- und Überwachungseinheit geliefert werden. Zur frühzeitigen Erfassung der Werkstückdaten werden in mehreren Forschungsprojekten optische Sensoren in den Bearbeitungsprozess integriert.**

Für die Optimierung und Automatisierung von Herstellungsprozessen in einer Bearbeitungsmaschine ist eine intelligente Maschinensteuerung notwendig, die selbständig fehlerhafte Zustände erkennt und diese korrigiert bzw. entsprechende Gegenmaßnahmen einleitet. Um dies zu ermöglichen, sind detaillierte Kenntnisse über den aktuellen Zustand der Bearbeitung notwendig. Dies kann nur durch angepasste Sensoren erreicht werden, die den Herstellungsprozess überwachen und

die notwendigen Daten an die Maschinensteuerung weiterleiten.

In modernen Werkzeugmaschinen sind in der Regel bereits Sensoren integriert. Diese beschränken sich aber im Allgemeinen auf die Beschreibung oder Erkennung von Störungen. Das Ziel der Prozessüberwachung ist es, auch bei einer Abweichung des Produktionsergebnisses von der gewünschten Qualität auf Grund von Werkzeugverschleiß, Dejustage, externen Umwelteinflüssen, etc., einen möglichst frühzeitigen Eingriff in den Bearbeitungsprozess zu ermöglichen, um so ein konstantes und zuverlässiges Bearbeitungsergebnis zu erzielen. Für diesen Zweck weisen optische Sensoren eine Reihe von Vorteilen auf, wie die berührungslose Erfassung geometrischer Werkstückdaten, die hohe Messgeschwindigkeit und die Möglichkeit die Sensoren zu miniaturisieren.

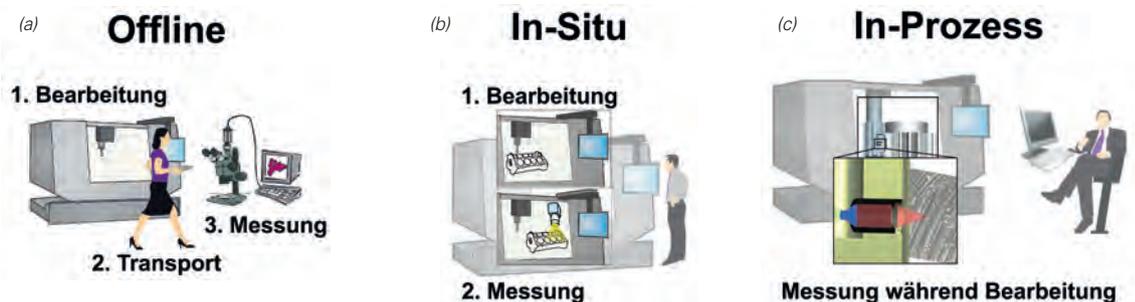


Abb. (a), (b), (c): Schematische Darstellung der prozess- und werkzeugintegrierten Sensorik

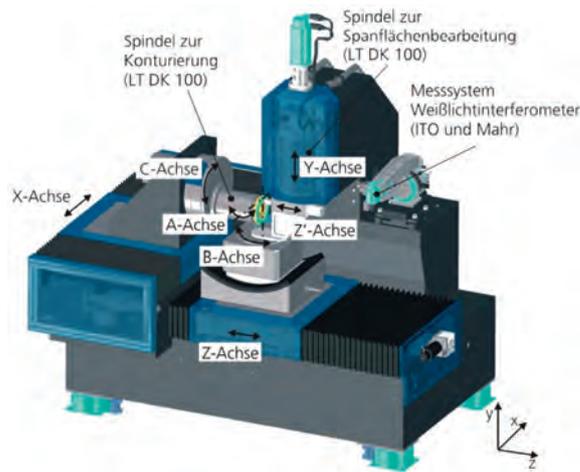
Der Unterschied zwischen prozessintegrierter- und werkzeugintegrierter Sensorik ist der Integrationsgrad. Dabei beschreibt der Grad der Integration inwieweit der Sensor direkt in den Fertigungsprozess eingebunden ist. Eine Offline-Prozessüberwachung stellt die klassische Qualitätssicherung dar, bei der die Objekte zur

Überprüfung aller Parameter an eine separate Messstation oder in ein Messlabor gebracht werden (Abbildung a). Die In-Situ Prozessüberwachung ermöglicht eine Überprüfung zwischen zwei Bearbeitungsschritten (Abbildung b). Bei der In-Prozess Überwachung (Abbildung c) ist die Sensorik so nah wie möglich an der Eingriffsstelle des Werkzeugs, also im optimalen Fall in das Werkzeug selbst integriert.

Lösungsansätze zur fertigungsnahen Vermessung von Objekten werden schon seit einigen Jahren in der Gruppe 3D-Oberflächenmesstechnik erarbeitet. Im Jahr 2005 wurde eine Dissertation fertiggestellt, die sich mit der Implementierung eines Weißlichtinterferometers mit einer standardisierten Werkzeugaufnahme zur direkten Integration in eine CNC Bearbeitungsmaschine zur In-Line Kontrolle von Bohrlöchern befasst [1]. Die optische Messtechnik ist aber vor allem in der Laserbearbeitung und in der Mikro- und Feinbearbeitung eine herausragende Technik zur Messung in der Produktionsumgebung. Am Institut für Technische Optik wurde für die Erfassung der Bearbeitungstiefe beim Laserschweißen im Rahmen des BMBF-Projektes INESS dazu ein Lösungsansatz mit konfokaler und spektraler Diskriminierung erarbeitet. Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit der Vermessung des Durchmessers von mikroskopisch feinen Schneiddrähten beim elektrochemischen Fräsen (InnoNet-Projekt WM-Elf).

Im fertigungsnahen Umfeld kommt es häufig zur Verunreinigung von Oberflächen durch Öl-Schichten, wodurch die Erfassung der Oberfläche mit hochgenauen Messsystemen erschwert wird. Die Einflüsse der im Bearbeitungsprozess auftretenden Kontaminationen der Oberfläche auf Messungen mit Weißlichtinterferometrie und die Kompensation durch die Modellierung des Messprozesses wurden im Zuge einer weiteren Dissertation untersucht [2].

Aktuell erfolgt im InnoNet-Projekt iTool die Integration eines optischen Messsystems zur Bestimmung der mikroskopischen Schneidengeometrie eines Diamantwerkzeuges auf einer Ultrapräzisions-Bearbeitungsmaschine. Der optische Hybrid-Messkopf setzt sich aus einem digitalen Mikroskop mit Durchlichteinheit und einem Weißlichtinterferometer für hochgenaue Messungen zusammen. Die Forschungsarbeiten richten sich hier auf die Fertigung und Vermessung von nahezu beliebigen Schneidkantengeometrien auf der Bearbeitungsmaschine. Insbesondere wird mit den ultrapräzisen Bewegungsachsen dieser Maschine eine überlappfreie Registrierung der aufgenommenen Einzeltopografien ermöglicht.

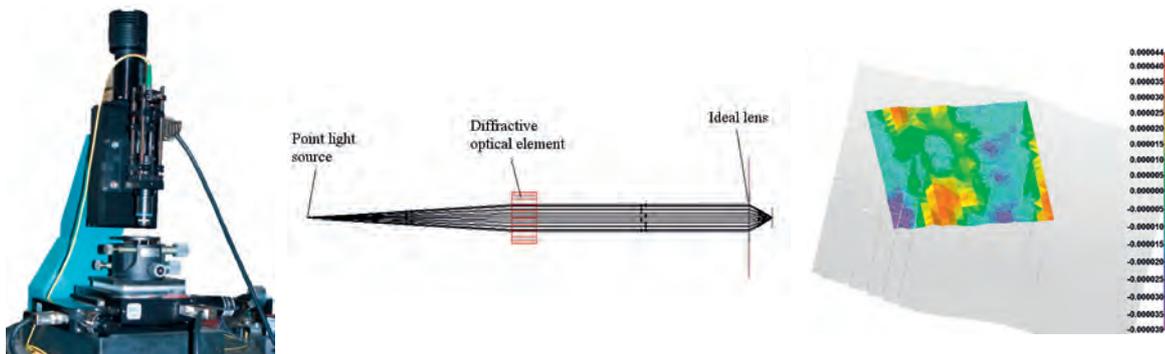


*Fertigungsmaschine von Diamantwerkzeugen mit integriertem optischen Messsystem zur Vermessung der Schneidengeometrie  
Bild: Fraunhofer IPT*

Die gesamte Schneidkantengeometrie wird interferometrisch durch mehrere Einzelmessungen erfasst. Nach der Registrierung von simulierten Einzelmessdaten erfolgt der Soll-Ist-Vergleich (a, b und c) anhand einer CAD-Referenz.

Heutige Sensorsysteme sind für den direkten Einsatz in der Werkzeugmaschine während des Bearbeitungsprozesses in Bezug auf Einflüsse aus der Fertigungsumgebung im Allgemeinen nicht robust genug. Aus diesem Grund müssen neue Sensorkonzepte erarbeitet werden, die diesen Anforderungen gerecht werden. Am ITO wird momentan ein Forschungsthema der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) bearbeitet, das sich mit dem Schwerpunkt der In-Process Integration von optischen Sensoren befasst. Für diese Untersuchungen wurde die Auswahl der in Betracht kommenden Sensoren zunächst auf die robusteste Klasse der optischen Sensoren, die Punktsensoren, beschränkt. Um eine hohe Robustheit zu gewährleisten, werden insbesondere die Single-Shot-Sensoren untersucht, mit denen die Erfas-

sung eines Tiefenprofils in einem Messschritt möglich ist. Für eine zuverlässige Datenauswertung bei einer Online-Überwachung unter Fertigungsbedingungen ist es notwendig, fundierte Kenntnisse über den Signalentstehungsprozess zu besitzen. Die Messsignale werden hauptsächlich von den Umgebungsbedingungen und dem Messobjekt selbst bestimmt. Für eine Untersuchung des Signalentstehungsprozesses wurde ein strahlbasiertes Simulationswerkzeug erstellt, um die Signalentstehung bei verschiedenen Umgebungsbedingungen und Messobjekten zu untersuchen [3]. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der Erstellung eines Modells für die Ray-Tracing-Simulation von rauen Oberflächen. Durch den Vergleich mit Messdaten von realen Sensoren konnte gezeigt werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulations- und Mess-



Chromatisch-konfokaler Testsensor, Simulation mit „non-sequential Ray-Tracing“ und Messergebnis

ergebnissen besteht. Mit Hilfe der Simulation wird in Zukunft untersucht, ob mit einer Definition von Indikatoren bei bestimmten Objektmerkmalen und mit einer angepassten Auswertalgorithmik eine zuverlässigere Signalauswertung erfolgen kann.

Mit Hilfe dieses Wissens soll die Implementierung eines miniaturisierten Sensors in eine Fertigungsumgebung vorgenommen werden. Als vielversprechendes optisches Messverfahren wird hier die chromatisch-konfokale Mikroskopie angesehen. Aber auch das am Institut für Technische Optik entwickelte und patentierte Verfahren der chromatisch-konfokalen Spektralinterferometrie (CCSI) erfüllt die geforderten Voraussetzungen [4, 5]. Dies sind ein hoher, anpassbarer Tiefenmessbereich sowie ein kleiner beugungsbegrenzter Messspot,

damit die Oberflächenrauheit erfasst werden kann, und eine Single-Shot-Aufnahme der Höhenwerte. Durch eine Implementierung der Messverfahren in eine Fertigungsumgebung soll die Möglichkeit der Online-Erfassung von Messdaten während des Bearbeitungsprozesses untersucht werden.

#### **Ausgewählte Publikationen:**

- [1] Franz, S.: „Optische Vermessung von Bohrungen“; Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.
- [2] Jackisch, S.: „Ein Beitrag zur interferometrischen Vermessung överschmutzter Funktionsflächen“; Dissertation, Universität Stuttgart, 2010.
- [3] Fleischle, D.; Lyda, W.; Haist, T.; Osten, W.: „Modeling and simulation of chromatic confocal sensor to measure rough surfaces“, DGAO-Proceedings, 110. Jahrestagung, 2009.
- [4] Lyda, W.; Fleischle, D.; Haist, T.; Osten, W.: „Chromatic Confocal Spectral Interferometry for Technical Surface Characterization“, Proc. SPIE Vol. 7434, 2009.
- [5] Fleischle, D.; Lyda, W.; Mauch, F.; Osten, W.: „Optical Metrology for process control: Modeling and simulation of sensors for a comparison of different measurement principles“; Proc. SPIE Vol. 7718, 2010.



## Holografische Mikromanipulation

**Photonen haben einen Impuls der proportional zur Lichtfrequenz ist. Durch Ablenkung von Licht an Objekten ergibt sich so eine Impulsänderung, die aufgrund der Impulserhaltung dann zu einer Kraft auf das ablenkende Objekt führt. Holografische Techniken eignen sich hervorragend, um auf diese Weise mikroskopische Weise zu manipulieren.**

Eine genaue Analyse der Lichtablenkung an transparenten Objekten und der daraus resultierenden Kräfte zeigt, dass die Objekte, z.B. Zellen oder transparente Mikrosystemteile, zum Fokus eines Lichtfelds gezogen werden. Wird der Fokus bewegt, dann wandert das gefangene Objekt mit und kann somit bewegt werden. In konventionellen optischen Pinzetten wird ein stark fokussierter Laserstrahl zur Manipulation eingesetzt und mittels mechanischer Spiegelverstellung (x/y Scanner) oder akusto-optischer Modulation abgelenkt. Abb. 1 zeigt den mechaniklosen, holografischen Ansatz, der am ITO 1998 realisiert wurde und seither von vielen Gruppen als Holographic Optical Tweezers (HOT) weltweit eingesetzt wird: Ein räumlicher Lichtmodulator (engl. Spatial Light Modulator, SLM) wird in einer zur Pupille des eingesetzten Mikroskopobjektivs konjugierten Ebene eingebracht. Damit ergibt sich in der Probenebene des Mikroskops letztlich die Fouriertransformation des in den SLM eingeschriebenen Hologramms. Diese Hologrammrekonstruktion dient somit zur Realisierung einer nahezu beliebigen Lichtverteilung zum simultanen Einfang vieler Objekte im dreidimensionalen Probenvolumen. Aufgrund der digitalen Ansteuerung und der Vermeidung bewegter Mechanik ergibt sich eine hochgenaue und hochreproduzierbare individuelle Steuerung der Objekte in drei Dimensionen.

Nachteil der Methodik ist die durch den SLM verminderte Lichteffizienz. Allerdings kann heute mittels phasenschiebender reflektiver Flüssigkristall-Lichtmodulatoren eine sehr gute Gesamteffizienz der Modulatoren von bis zu 80% erreicht werden. In der Anfangszeit war die notwendige Berechnung der Fourierhologramme eine weitere ernstzunehmende praktische Beschränkung der holografischen Pinzetten da eine Berechnung der Hologramme in Videoechtzeit mit konventioneller Rechentechnik nicht möglich war. Seit einigen Jahren ist dieser Nachteil nicht mehr relevant, da eine Berechnung in Videoechtzeit inzwischen durch die Nutzung der hochgradigen Parallelität aktueller Grafikkarten zu geringen Kosten möglich ist.

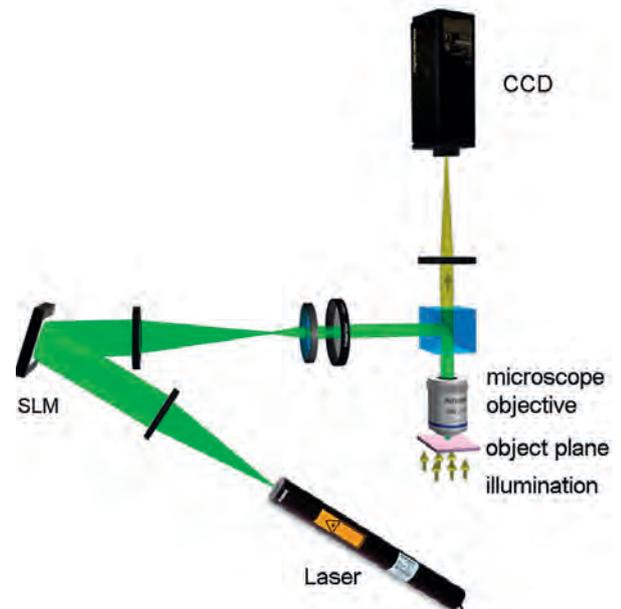


Abb. 1



Abb. 2: Bewegung zweier Objekte im dreidimensionalen Raum. Bei Verschiebung in axialer Richtung erscheint das Objekt aufgrund der Defokussierung im Mikroskop unscharf.

Die Flexibilität der Methode erlaubt eine Vielzahl von Verfahren, die mit klassischen Techniken nicht möglich sind. So lassen sich z.B. Aberrationen auf einfache Weise korrigieren, genauso wie die Punktbildfunktion des Mikroskops gezielt und kontrolliert geändert werden kann, z.B. zur Realisierung von in der Tiefe ausgedehnten Fallen (Fourier-Bessel Fallen), von Doughnut-förmigen Fallen oder zellschonenden ausgedehnten Fallen.

Weitere interessante Einfangverfahren basieren auf der Nutzung mehrerer Einzelfallen pro zu manipulierendem Objekt. So lassen sich mit zwei Fallen pro Objekt z.B. Zellen in drei Dimensionen beliebig und hochgenau kontrolliert drehen und kippen. Weiterhin können zwei Fallen über eine axiale Separation als sogenannte Twin-Traps (siehe Abb. 3) eingesetzt werden. Hierdurch wurde es erstmals möglich, mit konventionellen Forschungsmikroskopen auch bei geringer numerischer Apertur (Vorteile: erhöhte Tiefenschärfe und Arbeitsabstand und verringerte Probleme/Kosten) Objekte stabil in drei Dimensionen einzufangen.

Neben der nichtinvasiven und möglichst schonenden Manipulation kann die Methodik natürlich auch bei geringerer Wellenlänge (nahes UV) und höherer Pulsleistung zur gezielten Zerstörung oder zum Schneiden eingesetzt werden.

Die seit der Einführung der holografischen Mikromanipulation am ITO entwickelten grundlegenden Verfahren wurden inzwischen in Kooperation mit dem Institut für klinische Pharmakologie (IKP) am Robert-Bosch-Krankenhaus, Stuttgart zur Krebsdiagnostik eingesetzt und mit verschiedenen Industriepartnern im Rahmen mehrerer Projekte umgesetzt.

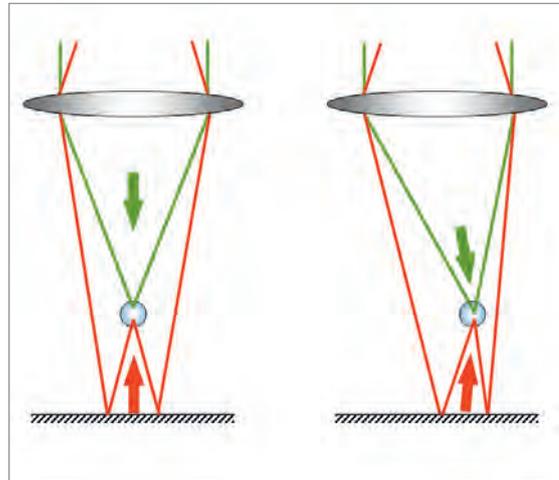


Abb. 3: Holografische Twin-Traps: Eine zweite Falle wird axial versetzt, dass nach Reflexion am Objektträger die Falle auf der ersten Falle zum liegen kommt. Hierdurch heben sich die vergleichsweise starken Streukräfte der beiden Fallen gegenseitig auf und ein stabiler 3D Einfang ist möglich.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Reicherter, M.; Haist, T.; Wagemann, E.U.; Tiziani, H.J.: „Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display“, *Optics Letters*, 1999, 24, 608-610
- [2] Liesener, J.; Reicherter, M.; Haist, T.; Tiziani, H.J.: „Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms“, *Optics Communications*, 2000, 185, 77-82
- [3] Schaal, F.; Warber, M.; Zwick, S.; van der Kuip, H.; Haist, T.; Osten, W.: „Marker-free cell discrimination by holographic optical tweezers“, *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 09028 Vol 4* (2009)
- [4] Reicherter, M.; Gorski, W.; Haist, T.; Osten, W.: „Dynamic correction of aberrations in microscopic imaging systems using an artificial point source“, *SPIE*, 2004, 5462, 68-78
- [5] Zwick, S.; Haist, T.; Miyamoto, Y.; He, L.; Warber, M.; Hermerschmidt, A.; Osten, W.: „Holographic twin traps“, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 11 (2009) 034011
- [6] Reicherter, M.; Zwick, S.; Haist, T.; Kohler, C.; Osten, W.: „Fast digital hologram generation and adaptive force measurement in LCD based holographic tweezers“, *Applied Optics* 45(5), pp. 888-896 (2006).
- [7] Haist, T.; Reicherter, M.; Min Wu; Seifert, L.: „Using Graphics Boards to compute holograms“, *Computing in Science & Engineering - January 2006*, pp. 8-14 (2006).

## MicroSim und aktuelle Anwendungsgebiete

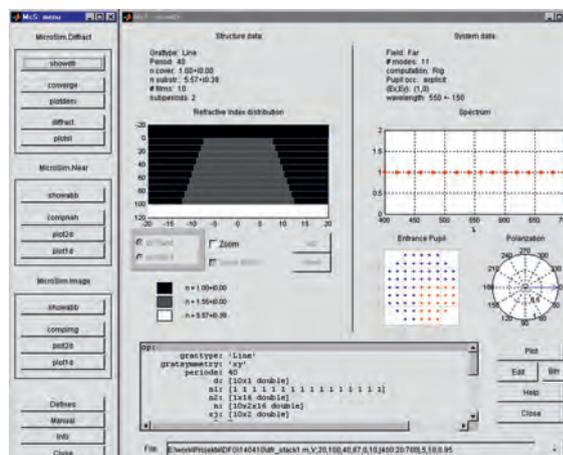
**MicroSim ist ein am Institut für Technische Optik entwickeltes Softwarepaket zur numerischen Lösung der Maxwell-Gleichungen für die vollständig rigorose Beugungsrechnung an periodischen Strukturen sowie der Simulation und Visualisierung verschiedener Mikroskopie-Methoden an solchen Strukturen. Auch wird MicroSim intensiv in Kooperation mit Partnern aus der Halbleiterindustrie verwendet um optische Messverfahren in der Halbleiter-Metrologie zu untersuchen, zu optimieren und zu erweitern.**

Ende der 90er Jahre begann Dr. Michael Totzeck am Institut für Technische Optik ein Programm zur rigorosen Simulation [1] der optischen Mikroskopie zu entwickeln. Seit damals wurde das Programmpaket MicroSim kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert.

Um die Herausforderung der rigorosen Simulation der optischen Mikroskopie zu bewältigen, muss man sich zwei Aufgaben widmen. Zum einen, die Ausbreitung des Lichtes durch das optische System für die Beleuchtung und Abbildung, sowie zum anderen die Berechnung der Nahfeld-Beugung an den betrachteten Strukturen. Die Simulation des optischen Systems wird in MicroSim mit Hilfe des sogenannten Pupillen-Ansatzes von Hopkins durchgeführt. Zur Berechnung der Nahfeld-Beugung an den abzubildenden periodischen Strukturen sind die Maxwell-Gleichungen zu lösen. Dies wird in MicroSim hauptsächlich mit der sogenannten RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis) Methode [2, 3] durchgeführt, welche auch den Kern von MicroSim bildet. Zusätzlich sind später noch weitere alternative Methoden implementiert worden, wie die Differentielle Methode oder die vektorielle Kirchhoff'sche Näherung [4].

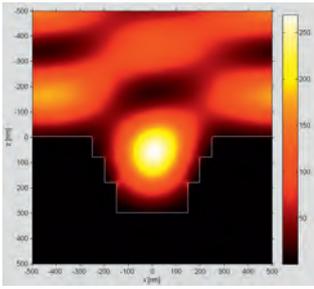
In MicroSim können auch komplexere periodische 3D-Strukturen berücksichtigt werden, indem man die Struktur mit Hilfe einer Treppenstufen-Näherung in einzelne Schichten zerlegt, die auch unterschiedliche Brechungsindizes haben können.

Die Simulation erlaubt dann, neben der Berechnung des Nahfeldes, auch das zugehörige Fernfeld, Mikroskopbild, Pupillenbild oder jegliche sonstige Information, die man der kompletten rigoros berechneten Beugungsinformation entnehmen kann, zu erhalten und zu visualisieren.



### ■ Aufbau

MicroSim ist in der Programmiersprache MATLAB geschrieben, die die notwendige Flexibilität für eine einfache Erweiterbarkeit und Implementierung neuer Verfahren bietet. Dabei ist MicroSim den komplexen Problemstellungen entsprechend modular aufgebaut. Das Diffract-Modul beinhaltet die rigorose Beugungssimulation, Klassen zur Definition von 2D oder 3D periodischen Strukturen, sowie der Beleuchtungsei-



genschaften des optischen Systems. Die grafische Darstellung von Struktur und Beleuchtungseigenschaften ist ebenfalls in diesem Programm-Modul zu finden. Das Near-Modul erlaubt die Berechnung, Darstellung und Auswertung des Nahfeldes. Dieses wird aus dem durch das Diffract-Modul gewonnen vollständigen Beugungsspektrum berechnet, wobei auch evaneszente Felder einen wichtigen Beitrag zum Nahfeld bilden. Ein weiteres Modul ist das Image-Modul, es erlaubt die Berechnung und Darstellung der Felder in der Abbildungsebene und ist somit zur Simulation von Fernfeld-Mikroskopbildern gedacht. Durch Superposition aller propagierenden Moden des Beugungsspektrums wird das Fernfeld berechnet, so ist es möglich verschiedenste mikroskopische Abbildungstechniken zu simulieren. Dies beinhaltet u.a. die Hellfeldmikroskopie unter vollständiger Berücksichtigung von Aberrationen, Apodisation, Dunkelfeld-Abbildung, Phasenkontrastverfahren nach Zernike, Interferenzmikroskopie, verschiedene Arten von Polarisationsmikroskopie, Weißlichtinterferometrie, Fourier-Scatterometrie, etc.

#### ■ Aktuelle Anwendungen

Neben den typischen Mikroskopie-Anwendungen wird MicroSim zurzeit unter anderem in der Arbeitsgruppe der Hochauflösenden Messtechnik und Simulation auf verschiedensten Forschungsgebieten verwendet.

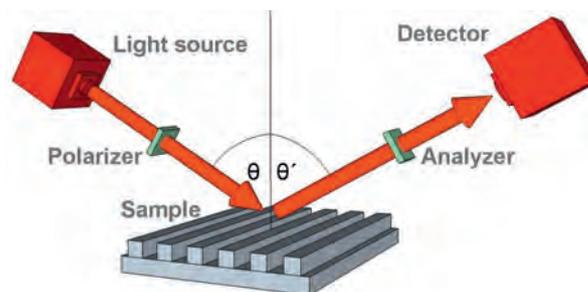
Ein wichtiges Forschungsgebiet ist die Halbleiter-Metrologie, welche im nächsten Abschnitt näher beschrieben werden soll.

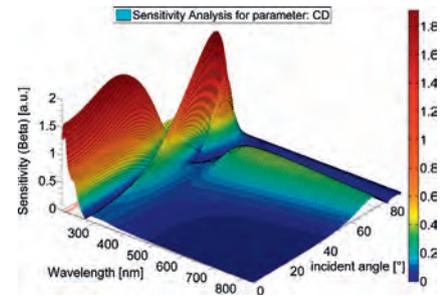
Ein weiteres wichtiges aktuelles Anwendungsgebiet von MicroSim findet sich im Design neuartiger Materialien, mit besonderen optischen Eigenschaften, den Metamaterialien. Zum Design solcher Materialien mit einem negativen Brechungsindex ist es nötig resonante Strukturen, die kleiner als die Wellenlänge sind, herzu-

stellen. MicroSim ermöglicht es das optische Verhalten solcher Materialien zu studieren, zu optimieren und somit weitere Erkenntnisse im Vorfeld zu experimentellen Arbeiten zu gewinnen. Nähere Details finden sich im Kapitel über Metamaterialien.

#### ■ Höchstauflösende Halbleiter-Metrologie

Die optische Halbleiter-Metrologie hat sich neben der Rasterelektronenmikroskopie (CD SEM) als Methode zur quantitativen Vermessung von kritischen Dimensionen (CDs) in der Serienfertigung von Halbleiterstrukturen etabliert. Durch die im Laufe der Geschichte in der Halbleiter-Industrie immer kleiner werdenden Strukturen, die mittlerweile schon weit unterhalb des, bei den verwendeten Beleuchtungswellenlängen, theoretischen optischen Auflösungslimits liegen, sind die Anforderungen an die Metrologie in diesem Bereich höchsten Anforderungen unterlegen. Klassische abbildende optische Verfahren können deshalb solche Strukturen nicht mehr vollständig auflösen. Optische Messverfahren für die Metrologie in diesem Bereich sollten eine hohe Messgeschwindigkeit bieten, einen möglichst geringen technischen Aufwand bedeuten und eine möglichst geringe Wechselwirkung mit den zu untersuchende Objekten haben, um Beeinflussung der Strukturen zu vermeiden.





Verfahren wie die Scatterometrie [5], Diffraktometrie oder Defektoskopie [6] ermöglichen es die kritischen Strukturparameter solcher Halbleiterstrukturen, sowie mögliche Störungen der Periodizität, über die Auswertung der kompletten Beugungsinformation an solchen Strukturen zu ermitteln. Das an periodischen Arrays aus Nanostrukturen gebeugte Licht wird polarisationsoptisch vermessen. Neben der eigentlichen Messung werden anhand der durch Referenzmessungen bekannten Strukturparameter Datenbanken möglicher Beugungsspektren berechnet. Durch den Abgleich von Messungen und vorberechneter Simulationen können so die unbekanntenen Strukturparameter rekonstruiert werden. Wesentlich für das Verfahren ist die präzise Modellierung der zu vermessenden Strukturen, die

auch Informationen über Prozessschwankungen sowie mögliche Kantenrauigkeiten der Strukturen (Line Edge Roughness, LER [7]) beinhalten müssen. Es lassen sich bei Strukturgrößen weit unterhalb der Beugungsgrenze des verwendeten Lichts Genauigkeiten von einigen nm in der Rekonstruktion erreichen. Durch die Freiheiten in der Simulation ist es auch möglich im Vorfeld Vorausagen über Empfindlichkeiten auf die unterschiedlichen Parameter die von Interesse sind, optimale Konfigurationen und Grenzen der verschiedenen Messverfahren zu machen, z.B. für zukünftige noch kleinere Halbleiterstrukturen [5]. MicroSim wird dabei zur Modellierung der Strukturen, der Beugungsrechnung sowie der Berechnung und Visualisierung der Messgrößen oder Bilder die im Experiment zugänglich sind verwendet.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Totzeck, M.: „Numerical simulation of high-NA quantitative polarization microscopy and corresponding near-fields“, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 112, 2001, pp. 399-406.
- [2] Götz, P.; Schuster, T.; Frenner, K.; Rafler, S.; Osten, W.: „Normal vector method for the RCWA with automated vector field generation“, *Optics express*, vol. 16, 2008, pp. 17295-301.
- [3] Schuster, T.; Ruoff, J.; Kervien, N.; Rafler, S.; Osten, W.: „Normal vector method for convergence improvement using the RCWA for crossed gratings“, *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, vol. 24, 2007, pp. 2880-90.
- [4] Kervien, N.; Schuster, T.; Rafler, S.; Osten, W.; Totzeck, M.: „Vectorial thin-element approximation: a semirigorous determination of Kirchhoff's boundary conditions“, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 24, 2007, p. 1074.
- [5] Osten, W.; Ferreras Paz, V.; Frenner, K.; Schuster, T.; Bloess, H.; Secula, E.M.; Seiler, D.G.; Khosla, R.P.; Herr, D.; Michael Garner, C.; McDonald, R.; Diebold, A.C.: *Simulations of Scatterometry Down to 22 nm Structure Sizes and Beyond with Special Emphasis on LER*, AIP, 2009.
- [6] Rafler, S.; Petschow, M.; Seifert, U.; Frenner, K.; Göckeritz, J.; Osten, W.: „Effects of pupil discretization and Littrow illumination in the simulation of bright-field defect detection“, *Optics letters*, vol. 34, 2009, pp. 1840-2.
- [7] Schuster, T.; Rafler, S.; Ferreras Paz, V.; Frenner, K.; Osten, W.: „Fieldstitching with Kirchhoff-boundaries as a model based description for line edge roughness (LER) in scatterometry“, *Microelectronic Engineering*, vol. 86, 2009, pp. 1029-1032.

## Metamaterialien

Als Metamaterialien bezeichnet man künstlich hergestellte Strukturen, deren Materialparameter  $\epsilon$  und  $\mu$  nahezu beliebige und damit in der Natur nicht vorkommende Werte annehmen können. Metamaterialien mit negativem  $\epsilon$  und  $\mu$  und damit negativem Brechungsindex könnten für die Realisierung von Superlinsen benutzt werden, die eine Abbildung von sub- $\lambda$  Strukturen jenseits des Beugungslimits ermöglichen.

Nach dem bekannten Abbe-Limit ist die Auflösung eines Mikroskops dadurch begrenzt, dass mindestens zwei Beugungsordnungen in das mikroskopische Objekt fallen müssen. Aufgrund dieser Begrenzung stoßen herkömmliche optische Methoden bei der Charakterisierung von nanostrukturierten Oberflächen, wie sie in der heutigen Halbleiterindustrie zum Standard geworden sind, schnell an ihre Grenzen. Der Wunsch

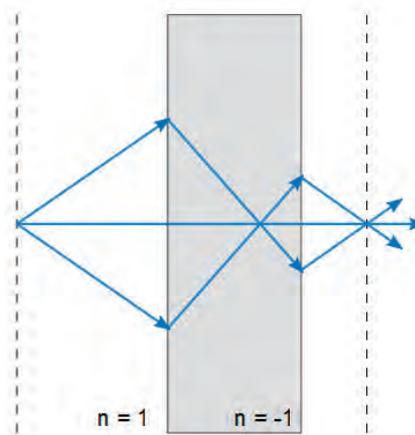


Abb. 2  
Perfekte Linse aus  
einem Material mit  
 $n = -1$  nach J. B.  
Pendry

nach einem einfach anzuwendenden, nicht invasiven Abbildungssystem, das mit sichtbaren Wellenlängen oder im nahen IR-Bereich arbeitet und höchstauflösende mikroskopische Abbildungen erzeugt, ist daher ungebrochen.

Bedeutend für die Realisierung eines solchen Systems sind die Überlegungen Veselagos [1] im Jahre 1967, der erstmals theoretisch zeigte, dass ein Material mit gleichzeitig negativer dielektrischer Permittivität  $\epsilon$  und magnetischer Permeabilität  $\mu$  auch einen negativen Brechungsindex besitzen müsste. Daraus resultiert unter Anderem, dass der Poynting-Vektor  $\vec{S}$  in die entgegengesetzte Richtung des Wellenvektors zeigt und dass das Dreibein aus  $\vec{k}$ ,  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  linkshändig orientiert ist (Abb. 1). Später griff Pendry diese Idee auf und sagte vorher, dass ein Material mit negativem Brechungsindex zu einer Linse führen könnte, die nicht mehr ans Beugungslimit gebunden ist [2] (Abb. 2).

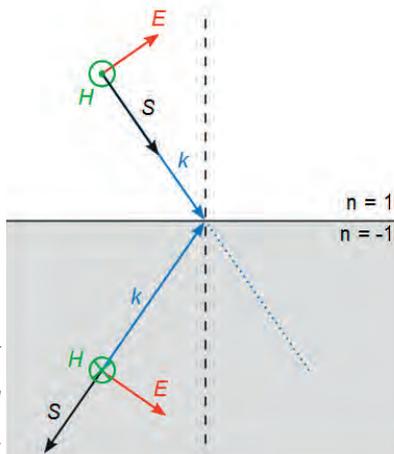


Abb. 1  
Verhalten einer  
TM-Welle in  
einem Material  
mit negativem  
Brechungsindex

Da in der Natur keine Materialien mit negativem Brechungsindex oder negativer Permeabilität existieren, müssen die Materialparameter  $\epsilon$  und  $\mu$  durch periodische Strukturen, die viel kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sind, künstlich eingestellt werden. In diesem Fall spüren elektromagnetische Wellen nur effektive Materialeigenschaften. Erstmals im Mikrowellenbereich realisiert wurde ein derartiges Negativ-Index-Material anhand einer Kombination von Metalldrähten (für  $\epsilon < 0$ ) und so genannten Split-Ring-Resonatoren (Abb. 3), die eine magnetische Resonanz ( $\mu < 0$ ) hervor rufen [3]. Das Wirkungsprinzip eines Split-Ring-Resonators lässt sich einfach verstehen wenn man ihn als elektrischen Schaltkreis auffasst. Der hufeisenförmige Teil der Struktur entspricht einer Spule (mit einer Windung) und der Spalt einem Kondensator. Somit erhält man bei entsprechender Ausrichtung von elektrischen und magnetischen Feldanteilen des einfallenden Lichtes einen LC-Schwingkreis. In der Nähe der LC-Resonanzfrequenz, die von den geometrischen Parametern der Struktur abhängig ist, ergibt sich dann eine negative magnetische Permeabilität.

Problematisch für Anwendungen im sichtbaren Bereich sind die erforderlichen sehr geringen Strukturgrößen in der Größenordnung von 100 nm. Deshalb wird am ITO in Kooperation mit dem 4. Physikalischen Institut eine vom Split-Ring-Resonator abgewandelte Struktur untersucht (Abb. 3), die zu einem Gitter erweitert und als Stapel mit Trennschichten aus Dielektrika aufgebaut werden kann. Der Vorteil einer solchen Mäander-Struktur liegt neben der einfacheren Fertigung darin, dass Plasmonen über Gittereffekte direkt von einfallendem Licht angeregt werden können. Die Plasmonenkopplung mit einer Nachbarschicht kann dabei die gleichen Effekte erzeugen, wie ein Negativ-Index-Material [4], nämlich negative Brechung zwischen den Schichten und eine Verstärkung der evaneszenten Amplitude. Um mehr als

nur eine evaneszente Abbildung der sub- $\lambda$  Struktur zu erhalten, ist zusätzlich eine Überstruktur nötig, die für eine Vergrößerung und Auskopplung ins Fernfeld sorgt. Vorstellbar wären neben einer gekrümmten Fläche (ähnlich einer gewöhnlichen Glaslinse) oder schiefen Ebene [5] auch Mäander-Strukturen mit variabler Periode (siehe Abb. 4). Die abbildenden Eigenschaften von mäanderartigen Metamaterialien werden mit dem am ITO entwickelten Softwarepaket MicroSim untersucht, das rigorose Methoden (z.B. RCWA – Rigorous Coupled Wave Algorithm) einsetzt.

Wie wichtig und vielfältig die Anwendungsgebiete von Metamaterialien sind, hat auch ein kürzlich veröffentlichter Bericht des BMBF gezeigt. In dem so genannten Foresight-Prozess werden Metamaterialien in mehreren Forschungsfeldern als hochrelevant bezeichnet. Dazu zählen „Neue Werkstoffmaterialien“ (Smart Materials), „Nanotechnologie“ (Metamaterialien mit neuartigen optischen Eigenschaften) und „Optische Technologien“ (Manipulation und Kontrolle von Licht durch künstliche Materialien).

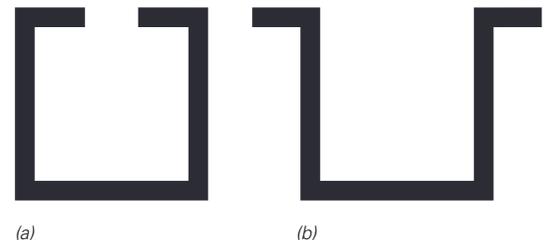


Abb. 3

(a) Split-Ring-Resonator und (b) Mäander-Struktur

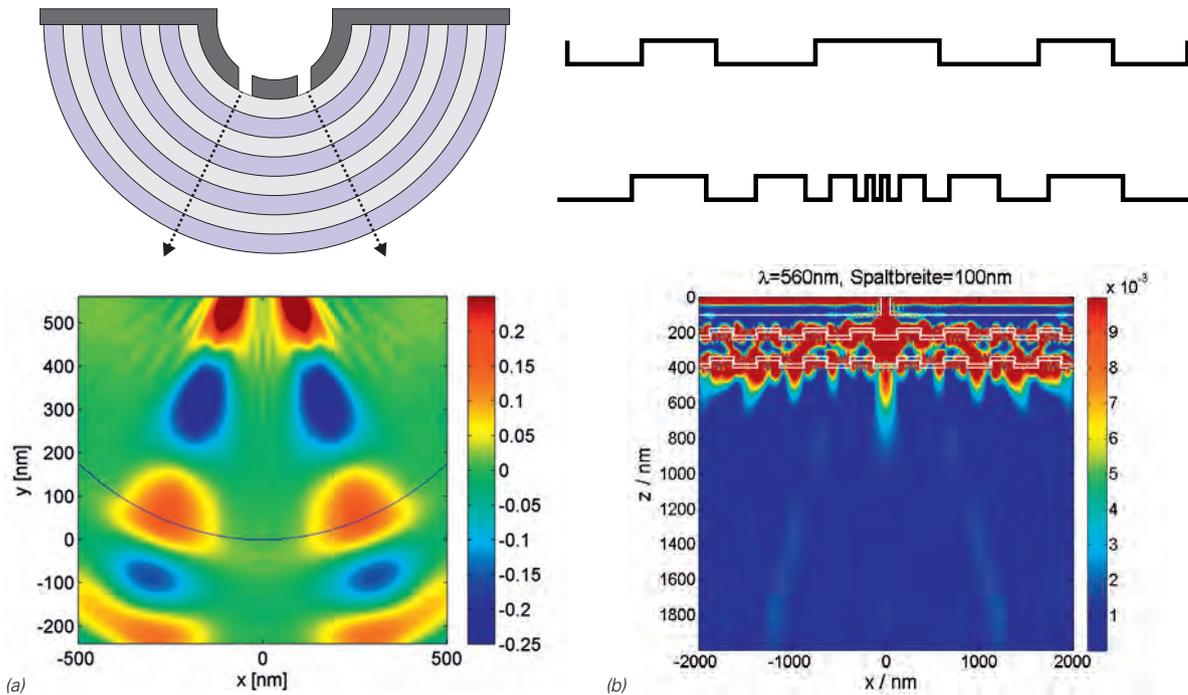


Abb. 4: Prinzipbild und numerische Simulation von Überstrukturen für die Nahfeld-Fernfeld-Transformation: (a) Gekrümmte Flächen bestehend aus alternierenden Dielektrikum- und Metallschichten, (b) Resonant-wechselwirkende mäanderförmige Struktur

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Veselago, V.G.: „The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ “, *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, 1968, pp. 509-514.
- [2] Pendry, J.B.: „Negative refraction makes a perfect lens“, *Physical review letters*, vol. 85, 2000, pp. 3966-9.
- [3] Shelby, R.A.; Smith, D.R.; Schultz, S.: „Experimental verification of a negative index of refraction“, *Science (New York, N.Y.)*, vol. 292, 2001, pp. 77-9.
- [4] Schau, P.; Frenner, K.; Fu, L.; Schweizer, H.; Osten, W.: „Coupling between surface plasmons and Fabry-Pérot modes in metallic double meander structures“, *Proc. SPIE*, Vol. 7711, 2010, p. 77111F.
- [5] Maisch, S.; Schau, P.; Frenner, K.; Osten, W.: „About the feasibility of nearfield-farfield transformers based on optical metamaterials“, *Fringe 2009: 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology*, 2009, pp. 375-383.

## Asphärenmesstechnik

**Eine Thematik mit langjähriger Tradition am Institut für Technische Optik ist die Asphärenmesstechnik [1]. Damit wird die hochgenaue Vermessung von Linsen- und Spiegelflächen bezeichnet, die von der traditionellen, gut fertig- und vermessbaren Kugelgestalt abweichen, also im Wortsinn A-sphärisch sind. Asphärische Flächen helfen, besser korrigierte, kompaktere und leichtere Optiksyste-me zu realisieren, was ihre hohe Bedeutung für die Optikindustrie erklärt.**



*Asphärischer Prüfling*

Der wesentliche Grund, weshalb traditionelle Linsenflächen Kugelschalengestalt haben, ist die hohe Symmetrie dieser Flächen, wodurch sie einfach zu fertigen und toleranter bei der Justage des Gesamtsystems sind. Auch in der Messtechnik, die eine wesentliche Komponente des Fertigungsprozesses ist, nutzt man die hohe Symmetrie aus, wodurch die Vermessung von Kugelflächen vergleichsweise einfach ist.

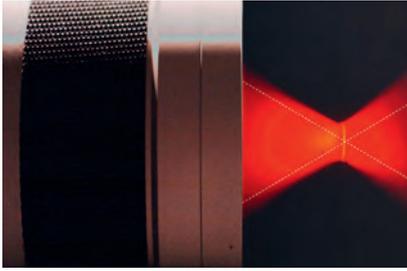
Allerdings erkaufte man sich diese Vorteile mit Nachteilen beim Optikdesign, da die Kugelfläche oftmals nicht die ideale Linsenform ist und somit Aberrationen entstehen, die durch den Einsatz weiterer Linsen korrigiert werden müssen. Dies führt zu komplexeren, schwereren Optiken, insbesondere bei anspruchsvollen Abbildungs- bzw. Beleuchtungssystemen.

Neue Fertigungstechnologien, wie das computergesteuerte zonale Polieren, Ionenstrahlbearbeitung oder das magnetorheologische Finishing sowie Replikationstechniken, wie das Blankpressen, erlauben mittlerweile die sehr präzise Herstellung von Asphären, die allerdings immer nur so genau sein kann wie die begleitende Messtechnik zur Kontrolle der Oberflächenform.

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten am ITO auf diesem Gebiet lag und liegt primär im Bereich der flächigen optischen und damit kontaktlosen Vermessung von Asphären. Hierbei gibt es prinzipiell zwei Ansätze:

■ Messsysteme mit einer sehr hohen Messdynamik, die die Abweichung der Prüflingsfläche von einer bestpassenden Sphäre messen. Die Sollform wird von den gewonnenen Messdaten abgezogen, womit man die gesuchten Abweichungen des Prüflings von seiner Sollform erhält. Die Flexibilität ist bei diesem Ansatz hoch, man benötigt keine Rüstzeiten. Beispiele für solche Systeme sind der adaptive Shack-Hartmann-Sensor [2], dessen per Mikrodisplay erzeugtes dynamisches Mikrolinsenarray an die Messaufgabe angepasst werden kann oder die Mehrwellenlängeninterferometrie [3]. Nachteilig ist, dass durch die spiegelnde Oberfläche des Prüflings das Prüflicht durch die Asphäre stark abgelenkt wird und damit im Extremfall den Detektor nicht mehr erreicht. Zusätzliche Fehler werden durch die Optiken des Messsystems eingeführt, was die Kalibration des Systems erschwert.

■ Messsysteme, die die Abweichungen des Prüflings von der Kugelform durch zusätzliche Optiken, sogenannte Nulloptiken, kompensieren. Damit wird idealerweise nur noch die Abweichung des Prüflings von der Sollform gemessen. Hierfür werden seit den 1980er Jahren am Institut computergenerierte Hologramme (CGH) entworfen, hergestellt und eingesetzt [4]. Der Nachteil bei diesem Ansatz ist, dass jeder neue Prüfling eine neue Nulloptik benötigt, was Kosten verursacht



Prüfraum beim Verfahren der verkippten Objektwelle (links). Zu sehen ist das Interferometerobjektiv, das nicht nur einen Fokus erzeugt, sondern eine ganze Reihe von Foki. Diese vielen Wellenfronten erzeugen eine Anzahl von Interferogrammen (rechts) und erlauben es, den Prüfling in wenigen Sekunden flächig mit hoher Präzision zu vermessen.

und Rüstaufwand bedeutet. Hier bieten flexible Nulloptiken, die verschiedene asphärische Wellenfronten erzeugen können, einen Lösungsansatz. Am Institut wurden hierfür in der Vergangenheit Optiken mit beweglichen Elementen („Asphärenzoom“) oder z.B. Membranspiegel [5] eingesetzt. Eine Herausforderung beim Einsatz von Nulloptiken ist die Trennung der Fehler der Nulloptik von den Fehlern des Prüflings. Gelingt dies vollständig, kann von einem absoluten Verfahren gesprochen werden. CGH, die mehrere Wellenfronten rekonstruieren, können hierfür die Basis bilden [6].

Die jüngste Entwicklung des ITO, das Verfahren der verkippten Objektwelle, nutzt eine Kombination aus der hohen Messdynamik einer hochauflösenden Kamera und einem Optiksistem, das den Prüfling mit einer Vielzahl verschiedener Wellenfronten beleuchtet. Genutzt werden nur die Anteile der Wellenfronten, die vom Detektor ausgewertet werden können. Damit konnte ein Messsystem realisiert werden, das eine sehr hohe Messdynamik aufweist, mit dem auch steile Asphären in sehr kurzer Zeit vermessen werden können [7]. Auch bei diesem Messverfahren spielt die Kalibrierung eine sehr wichtige Rolle, da neben den Aberrationen auf der Achse auch feldabhängige Aberrationen berücksichtigt werden müssen. Unser Lösungsansatz modelliert das Verhalten des Interferometers und löst das inverse Problem der Asphärenrekonstruktion durch einen störungstheoretisch motivierten Ansatz [8].



Computergeneriertes Hologramm (CGH) als diffraktive Nulllinse.

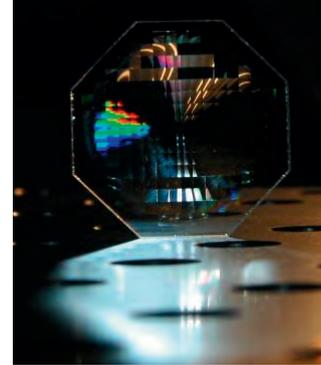
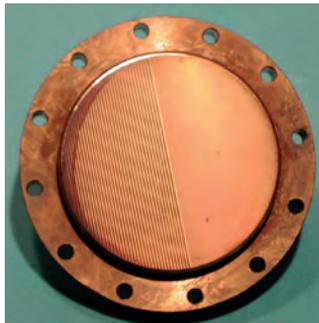
#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Wöhler, J.F.: „Prüfung asphärischer optischer Flächen durch interferometrische Methoden“, Dissertation, ITO, Stuttgart, 1970.
- [2] Seifert, L.; Liesener, J.; Tiziani, H. J.: „The adaptive Shack–Hartmann sensor“, *Optics Communications*, 216, S.313-319, 2003.
- [3] Hofbauer, U.: „Zweiwellenlängeninterferometrie mit Laserdioden“, Dissertation, ITO, Stuttgart, 2002.
- [4] Dörband, B.; Tiziani, H. J.: „Testing aspheric surfaces with computergenerated holograms: analysis of adjustment and shape errors“, *Applied Optics*, Vol. 24, No. 16, S. 2604-2611, 1985.
- [5] Pruss, C.; Tiziani, H. J.: „Dynamic null lens for aspheric testing using a membrane mirror“, *Optics Communications*, 233, S. 15-19, 2004.
- [6] Reichelt, S.; Pruss, C.; Tiziani, H. J.: „Absolute Interferometric Test of Aspheres by Use of Twin Computer-Generated Holograms“, *Appl. Opt.* 42, 4468-4479, 2003.
- [7] Garbusi, E.; Pruss, C.; Osten, W.: „Interferometer for precise and flexible asphere testing“, *Opt. Lett.* 33, 2973-2975, 2008.
- [8] Garbusi, E.; Osten, W.: „Perturbation methods in optics: application to the interferometric measurement of surfaces“, *J. Opt. Soc. Am. A* 26, 2538-2549, 2009.

## Fertigung diffraktiver Optik

**Eine effektive Nutzung diffraktiver Optiken setzt deren Verfügbarkeit voraus. Dieser Satz klingt trivial, ist aber einer der Ursachen, weshalb diffraktive Optiken nur langsam im industriellen Einsatz ankommen. Die Verfügbarkeit diffraktiver optischer Elemente (DOE) für neue Ansätze in der optischen Messtechnik ist auch der Hintergrund für die Einrichtung von Fertigungskapazitäten für diffraktive Elemente, die bereits in den 1980er Jahren am Institut für Technische Optik begonnen wurde und bis heute eine stete Weiterentwicklung erfahren hat.**

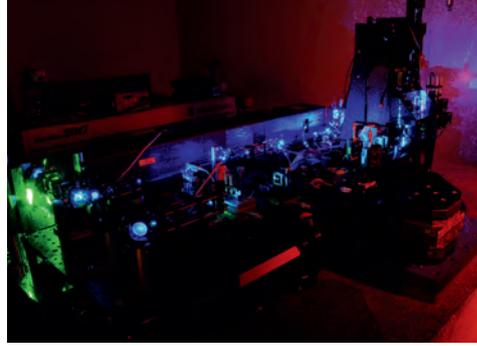
Bereits unter Professor Schulz wurden am Institut für Technische Optik holographische Gitter erzeugt [1]. Eine entscheidende Weiterentwicklung brachte jedoch erst der Einsatz von computergesteuerten, punktwise belichtenden Laserbelichtungsanlagen, mit denen im Rahmen der Auflösungsgrenzen des jeweiligen Geräts nahezu beliebige computergenerierte Hologramme (CGH) erzeugt werden konnten. Eine wesentliche Anwendung hierbei war die Erzeugung von CGH als Nulloptiken für den Asphärentest [2]. Das erste Belichtungsgerät, das hierfür beschafft und eingesetzt wurde, war ein Trommelbelichter der Firma Optronics, der in den 80er Jahren für die Erzeugung von binären CGH eingesetzt wurde. Ein optischer Verkleinerungsschritt der erzeugten Filme erlaubte die Generierung höherfrequenter Strukturen.



*Angepasstes  
Mikrolinsenarray für  
Wellenfrontsensoren.*

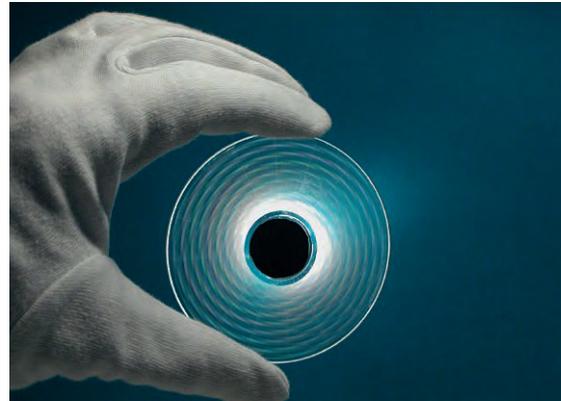
Der erste Reinraum wurde 1990 in Form einer 6 Quadratmeter-Reinraumkabine eingerichtet, in der ein Leitz-Ergoplan Inspektionsmikroskop die Basis für eine scannende Direktbelichtungsanlage mit einem Argon-Ionenlaser als Lichtquelle bildete. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 349 [3] wurden die Fertigungsmöglichkeiten weiterentwickelt, Laborbereiche mit erhöhter Reinheit eingerichtet, die erste Polarkoordinaten-Laserbelichtungsanlage CLWS300 [4] installiert. Galvanisch aufgebaute Kupfer-Hologramme bildeten die Grundlage für innovative Strahlformungs- und Strahldiagnostik-Ansätze im multi-Kilowatt-Leistungsstrahl für CO<sub>2</sub>-Laser[5][6]. Quasi-kontinuierliche Elemente mit hoher Beugungseffizienz wurden zunächst in binärer Mehrmaskentechnologie gefertigt. Diese wurde etwa mit Beginn des neuen Jahrtausends durch die Grautonbelichtungstechnologie ersetzt. Hierbei wird in einem Belichtungsvorgang ein quasikontinuierliches Profil erzeugt, indem Photolackprozesse mit geringem Kontrast und ein Schreibstrahl mit variabler Intensität eingesetzt werden [7]. Für Kleinserien können Grautonmasken den langwierigen Direktbelichtungsprozess ersetzen [8]. Die Anwendungen für quasikontinuierliche DOE sind vielfältig. In verschiedensten Forschungsprojekten wurden beispielsweise Strahlformungsoptiken für Diodenlaser und Laserprojektionssysteme, Optiken für Atomfallen, angepasste Mikrolinsenarrays für Wellenfrontsensoren und diffraktive Elemente für chromatisch-konfokale Sensoren designed und realisiert.

*Autofokussystem auf Basis eines als Kupferelement realisierten diffraktiven Elements (links) im Einsatz beim Laserschneiden (rechts).*



links: Reinraum der Klasse 100 am ITO  
rechts: Laserdirektbelichtung bei 458 nm

Mit Eröffnung des neuen Reinraums am 7.7.2006 erhielt die Fertigung diffraktiver Elemente ein neues Zuhause. Der etwa 100 Quadratmeter Nutzfläche umfassende Reinraum am ITO bietet für die DOE-Fertigung und die hochauflösende Halbleiterinspektion Arbeitsbereiche mit Reinraumklasse 100, feinklimatisierte Bereiche mit einer Temperaturkonstanz von besser 0,2 K, schwingungsentkoppelte Fundamente und eine kontrollierte Luftfeuchte. Die gesamte Prozesskette von der Belackung, über die Belichtung, bis zur Ätztechnologie (reaktive Ionenätzanlage mit ICP-Quelle) ist für Substratgrößen bis zu einem Durchmesser von 200 mm und einer Dicke von 20 mm ausgelegt.



Diffraktive Nipkow-Mikrolinsenscheibe.

Es stehen zwei Laserdirektbelichtungsanlagen zur Verfügung, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Beispielsweise wurde in einem kürzlich abgeschlossenen Projekt die Flexibilität in Bezug auf die Substratgeometrie erheblich erweitert. Dank eines neuartigen, am ITO speziell für diesen Zweck entwickelten Autofokusensensor können nunmehr auch gekrümmte Oberflächen mit hoher Präzision beschrieben werden. Aktuell sind Randtangentialwinkel bis zu 15° beschreibbar [9], zukünftige Entwicklungen werden etwa doppelt so steile Substrat-Randtangentialen möglich machen.

Die jüngste Erweiterung ist das Helios 600 NanoLab der Firma FEI. Es handelt sich hierbei um ein hochauflösendes Elektronenmikroskop (REM), das mit einer fokussierten Ionenstrahl-Bearbeitungsmöglichkeit (FIB) ausgestattet ist. Dieses Werkzeug erweitert ganz entscheidend die Analyse- und Strukturierungsmöglichkeiten in den Nanometerbereich und wird für Referenzmessungen und Nanostrukturierung eingesetzt werden.

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Obermayer, H.-A.: „Interferometrische Herstellung von reflektierenden Beugungsgittern mit hohem Wirkungsgrad und Untersuchung ihrer Eigenschaften“, Dissertation, ITO, Stuttgart, 1976.
- [2] Dörband, B.; Tiziani, H.J.: „Design of compensation-systems for the interferometric testing of aspherical surfaces“, OPTIK, Vol. 67, 1, S. 1-20, 1984.
- [3] SFB 349: Hochdynamische Strahlführungs- und Strahlformungseinrichtungen für die räumliche Bearbeitung mit Laserstrahlen, DFG, 1990-2001.
- [4] Poleshchuk, A.G.; et. al.: „Polar Coordinate Laser Pattern Generator for Fabrication of Diffractive Optical Elements With Arbitrary Structure“, Appl. Opt. 38, 1295-1301, 1999.
- [5] Hembd-Söllner, Ch.; Budzinski, Ch.; Tiziani, H.J.: „Binary Gratings for CO2 laser-beam diagnostics“, Applied Optics, Vol. 35, S. 3662-3670, 1996.
- [6] Pahlke, M.; Haupt, C.; Niessen, L.; Tiziani, H.J.: „Diffractive optics for CO2 Laser up to 5 kW“, in: Laser in Forschung und Technik Vorträge des 12. internationalen Kongresses Laser '95, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 919-922, 1996.
- [7] Pruss, C.; Reichelt, S.; Korolkov, V. P.; Osten, W.; Tiziani, H. J.: „Performance improvement of CGHs for optical testing“, Proc. SPIE, Vol. 5144, S. 460-471, 2003.
- [8] Korolkov, V. P.; Malyshev, A. I.; Poleshchuk, A. G.; Cherkashin, V. V.; Tiziani, H. J.; Pruss, C.; Schoder, T.; Westhauser, J.; Wu, C.: „Fabrication of gray-scale masks and diffractive optical elements with LDW glass“, Proc. SPIE, Vol. 4440, S. 73-84, 2001.
- [9] Häfner, M.; Reichle, R.; Pruss, C.; Osten, W.: „Laser direct writing of high resolution structures on curved substrates: evaluation of the writing precision“, in: W. Osten, M. Kujawinska, Fringe 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

## Brennraumdiagnostik

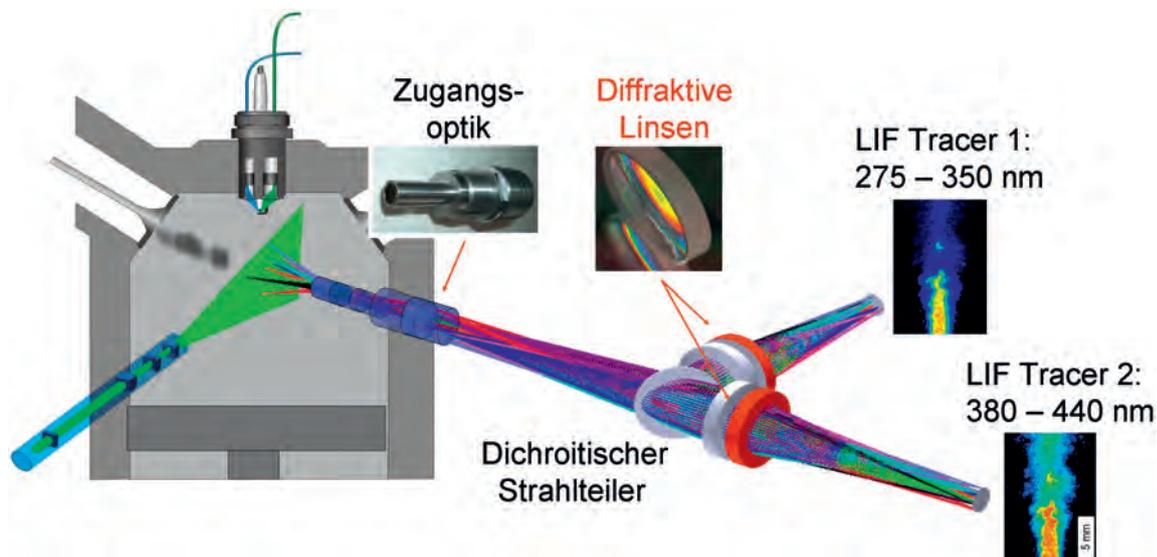
**Individuelle Mobilität ist ein Kennzeichen unserer modernen Gesellschaft. Solange Autos oder Flugzeuge noch nicht effektiv mit regenerativen Energien, wie etwa Wasserstoff, betrieben werden können, gilt es, den Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß von Verbrennungsmotoren schnell zu reduzieren. Dies zeigt die Bedeutung eines spannenden Anwendungsfeldes für refraktiv/diffraktive Hybridoptiken: Der minimalinvasiven optischen Brennraumdiagnostik.**

Active, lasergestützte Diagnostikverfahren, wie die Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF), erlauben eine orts- und zeitaufgelöste, berührungslose Bestimmung von wichtigen verbrennungsrelevanten Parametern, wie der Kraftstoffverteilung, der Temperatur oder des Sauerstoffgehalts des Kraftstoffgemischs. Die Informationen

stecken im generierten Fluoreszenzlicht, das jedoch nur mit einer sehr geringen Intensität entsteht. Dementsprechend wichtig ist die Lichtstärke der verwendeten Optiken.

Im Rahmen eines von der Baden-Württemberg Stiftung geförderten Kooperationsprojektes wurde für diesen Zweck ein optisches Schlüsselloch-Abbildungssystem für den besonders interessanten ultravioletten Spektralbereich entwickelt, das erstmals die minimalinvasive 2D-Messung von verbrennungsrelevanten Größen am seriennahen Motor ermöglicht [1]. Das System besteht aus einer Lichtschnittoptik, die für die Anregung bei 266 nm ausgelegt ist und einer abbildenden Weitwinkeloptik, die das im Lichtschnitt erzeugte Fluoreszenzlicht auf einen Bildverstärker abbildet. Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen, um den komplexen Einspritz-

Minimalinvasive Systeme zur Brennraumdiagnostik. Einblick in den Brennraum von oben über einen Zündkerzen-Punktsensor, seitlicher Einblick mit Lichtschnitttechniken. Links: Lichtschnittoptik, rechts: Endoskopsystem mit zwei individuell optimierten Spektralkanälen.



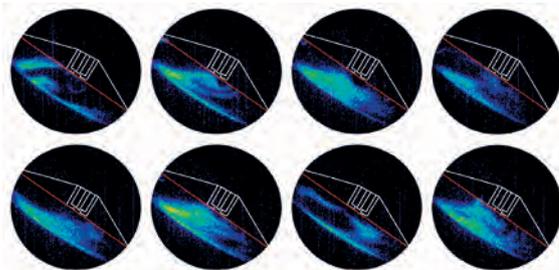
Auszeichnung des minimalinvasiven Hybriden Optik-Systems als „Best overall product“ auf der Innovationsmesse „Innovation Village 2008“ in Straßburg.



und Gemischbildungsvorgang im Verbrennungsraum gezielt untersuchen und optimieren zu können. Im Vergleich zum besten käuflichen UV-Endoskop erzielt das neu entwickelte System etwa die 10-fache Lichtstärke bei einer vergleichsweise breiten Farbkorrektur und ermöglicht hierdurch Messungen, die bisher nur an sogenannten „Gläsernen Motoren“ oder mit großen Fenstern stark modifizierten Motoren durchführbar waren. Das System wurde im Rahmen der internationalen Konferenz „Photonics Europe“ 2008 in Straßburg auf der Prototypen-Messe „Innovation Village“ präsentiert und als „Best Overall Product“ ausgezeichnet. Es ist mittlerweile kommerziell über die Firma LaVision GmbH [2] zu beziehen.

Aktuelle Forschungs- und Industrieprojekte in diesem Gebiet transferieren zum einen die grundsätzlichen Prinzipien auch auf andere Anwendungen, Spektralbereiche und Einsatzgeometrien und erweitern zum anderen die Palette an Diagnostikwerkzeugen, indem die Freiheitsgrade der diffraktiven Elemente im System konsequent weiter genutzt werden [3,4]. Eine weitere

Stoßrichtung verfolgt den Gedanken des minimalinvasiven Einsatzes weiter: Mit Hilfe von Mikrooptiken konnten sowohl die sehr starke Laseranregung als auch die Detektion in eine spezielle Zündkerze integriert werden, so dass nunmehr aktive lasergestützte LIF-Verfahren ohne mechanische Änderungen am Motor angewendet werden können. Zukünftige Forschungsarbeiten werden untersuchen, in wie weit hierbei die Auflösung von aktuell einigen Messpunkten weiter erhöht werden kann.



Erste minimalinvasive Aufnahmen mit den neuen Optiken aus dem fertigungsnahen Versuchsmotor: Zyklische Kraftstoffverteilungsvariationen bei 5° Kurbelwinkel, Single-shot Kraftstoff-LIF Messungen [4].

#### Ausgewählte Publikationen:

- [1] Reichle, R.; Pruss, C.; Osten, W.; Tiziani, H.J.; Zimmermann, F.; Schulz, C.: „Hybrid excitation and imaging optics for minimal invasive multiple-band UV-LIF-measurements in engines“, VDI-Berichte 1959 (2006), Seiten 223-235, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany.
- [2] <http://www.lavision.de/>
- [3] BMBF Verbundprojekt „MIMODIA“, FKZ 13N9456: Minimalinvasive motorische Diagnostik
- [4] Gessenhardt, C.; Zimmermann, F.; Schulz, C.; Reichle, R.; Pruss, C.; Osten, W.: „Hybrid endoscopes for laser-based imaging diagnostics in IC engines“, 2009, SAE 2009-01-0655

## Digitale Holografie

**Durch die Weiterentwicklung der elektronischen Bildsensoren (CCD, CMOS) und der digitalen Bildverarbeitung konnten sich Verfahren der digitalen Holographie etablieren. Nach der Registrierung und Speicherung der Hologramme auf dem Bildsensor bzw. im Computer erfolgt die Rekonstruktion durch eine digitale Simulation der Propagation des Wellenfeldes.**

Dieses digitale Aufnahme- und Rekonstruktionsprinzip hat viele Vorteile:

- Es ist keine aufwändige Entwicklung des Hologramms notwendig.
- Durch die Anwendung digitaler Algorithmen erfolgt eine direkte Rekonstruktion der komplexen Amplitude der Wellenfront, d.h. neben der Intensität kann auch die Interferenzphase des Interferenzfeldes rekonstruiert werden.

■ Hologrammserien können sehr schnell aufgezeichnet und auf beliebige Weise rekonstruiert werden.

■ Die Technik erlaubt einen weitaus höheren Grad an Automatisierung und Miniaturisierung als die konventionelle Holografie.

Der einzige praktische, jedoch nicht prinzipielle Nachteil ist die geringe Winkelauflösung des Verfahrens. Dies hängt ursächlich mit dem eingeschränkten Orts-Bandbreite-Produkt vorhandener elektronischer Bildsensoren zusammen.

Abbildung 1 zeigt, wie die digitale Holografie zur Visualisierung von Strukturen im Sub-Mikrometer Bereich verwendet wurde. Es wurde in diesem Fall eine UV Laserlichtquelle eingesetzt (193 nm). Das System hat eine Auflösung von 250 nm, besser als ein hochauflösendes Weißlicht-Mikroskop mit  $NA=0.8$ .

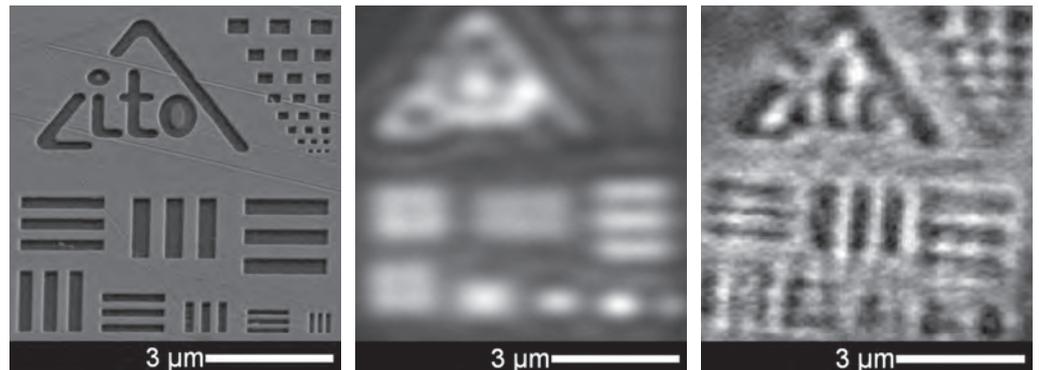


Abb. 1: ITO-Nano-Test Target aufgenommen mit (von links): REM, hochauflösendes optisches Mikroskop, UV digitale Holografie.

Die Verformungen von mikrosystemtechnischen Strukturen, deren Abmessungen typischerweise im Bereich einiger Mikrometer liegen, sollen mit Genauigkeiten im Nanometer Bereich bestimmt werden. Die digitale Holografie ist für die Messung solcher Verformungen von Mikrosystemen gut geeignet. Um die Messunsicherheit der Messsysteme zu schätzen, wurden zusammen mit dem IMTEK (Uni Freiburg) Referenznormale entwickelt, deren Verformung unter Belastung sehr genau bekannt ist. Diese Referenznormale sind mit elektrischen Anschlüssen versehen, die vom Nutzer an eine externe, rückführbar geeichte Spannungsquelle angeschlossen werden können. Die Anwendung vorgegebener elektrischer Spannungen ruft wohl definierte, reproduzierbare und rückführbare Verschiebungs- und Amplitudenfelder hervor.

Bild 2 (a) zeigt eines der am IMTEK hergestellten Referenz-Normale. Das mechanische Verhalten der Strukturen wurde in detaillierten FEM-Simulationen untersucht und die Geometrie der Strukturen optimiert.

Bild 2 (b) zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen (+), und aus der Modellierung erwarteten Werten (Linie) der Verschiebungen als Funktion der angelegten Spannung. Es ist zu bemerken, dass die theoretische Kurve mit der gemessenen Verschiebung gut übereinstimmt. Die Differenz zwischen diesen zwei Kurven ist in Bild 2 (c) dargestellt. In systematischen Versuchsreihen wurde die Messunsicherheit der Referenznormale analysiert. Die Unsicherheit in der Messung der „out of plane“-Verschiebung beträgt zurzeit  $\pm 1.5$  nm; für die „in plane“-Verschiebungen wird eine Unsicherheit von  $\pm 3$  nm erzielt.

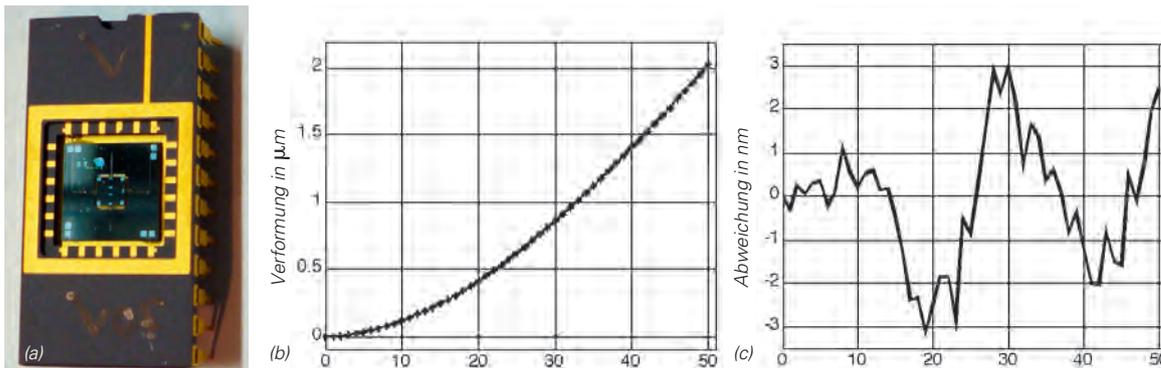


Abb. 2: (a) Referenz-Normal für out-of-plane-Verschiebungen, (b) Vergleich zwischen gemessenen (+) und erwarteten Werten (Linie), (c) Unterschied zwischen erwarteten und gemessenen Verschiebungen.

## Virtuelle holographische Labore und Remote-Experimente

**Virtuelle Labore und Remote-Experimente für die digitale Holographie (DH) werden implementiert und damit erstmals diese Technologien für eine größere Nutzergemeinschaft zur Verfügung gestellt.**

Der Benutzer des virtuellen Labors kann Objekte verschiedener Größe und Komplexität wählen und deren Hologramm berechnen. Die holographische Wiedergabe erlaubt eine 3D Darstellung der Objektwellenfront.

In Remote-Experimenten können verschiedene Objekte mit Submikrometer Strukturen (technische Objekte oder biologische Präparate) untersucht werden. Der Nutzer, der via Internet verbunden ist, hat die Möglichkeit, unter verschiedenen Testobjekten auszuwählen und sie mit Hilfe eines ferngesteuerten Roboters im Messaufbau einzuführen. Es kann untersucht werden, wie das Objekt auf Belastung (Temperatur-, Druck- oder Feuchtigkeitsänderung) reagiert.

Kern der Architektur (siehe Abb. 1) ist das holographische System, in dem sowohl Simulationen als auch ferngesteuerte Experimente durchgeführt werden können.

Verantwortlich für das holographische System ist ein „Operator“ (ITO Wissenschaftler), mit folgenden Aufgaben:

- Vorbereitung von Experimenten
- Ständige Verbesserung des Experimentalbaus
- Entwicklung von neuen Algorithmen und deren Integration
- Zeitliche Koordination der Experimente
- Verwaltung von Accounts

Um die Verbindung mit dem Labor und die Steuerung des Experiments zu erlauben, wird das holographische System mit einem Proxi (Rechner mit Linux Betriebssystem) verbunden. Nach erfolgreicher Authentifizierung erlaubt das Proxi die Kommunikation zwischen Nutzer und System.

Der Nutzer kann ebenfalls die Repositories „eSciDOC“ und die Bibliothek „OPUS“ verwenden, in denen Daten über holographische Versuche gespeichert und/oder heruntergeladen werden können.

Der Anschluss zur 3D-Plattform „Wonderland“ soll die Visualisierung von virtuellen Laboren und die 3D Darstellung von experimentellen Umgebungen und Ergebnissen ermöglichen.

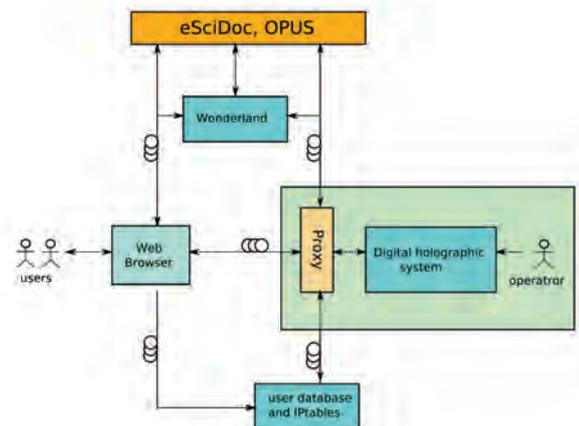


Abb. 1: Systemarchitektur für die digitale Holographie

Ein einfacher Aufbau für die Aufnahme von digitalen Hologrammen wurde bereits implementiert (siehe Abb. 2). Er enthält eine Lichtquelle (Laser), Fasern für die Lichtzuführung, Positioniertische, Objekt, CCD Kamera, und Rechner. Das Versuchssystem wird durch ein LabVIEW Programm gesteuert, das unter Verwendung eines Web Browser via HTTP-Protokoll verbunden ist. Simulationen der Ausbreitung von Wellenfronten im freien Raum wurden programmiert und damit die Rekonstruktion von 3D Objekten aus Hologrammen, die digitale Fokussierung und 3D Darstellung realisiert.

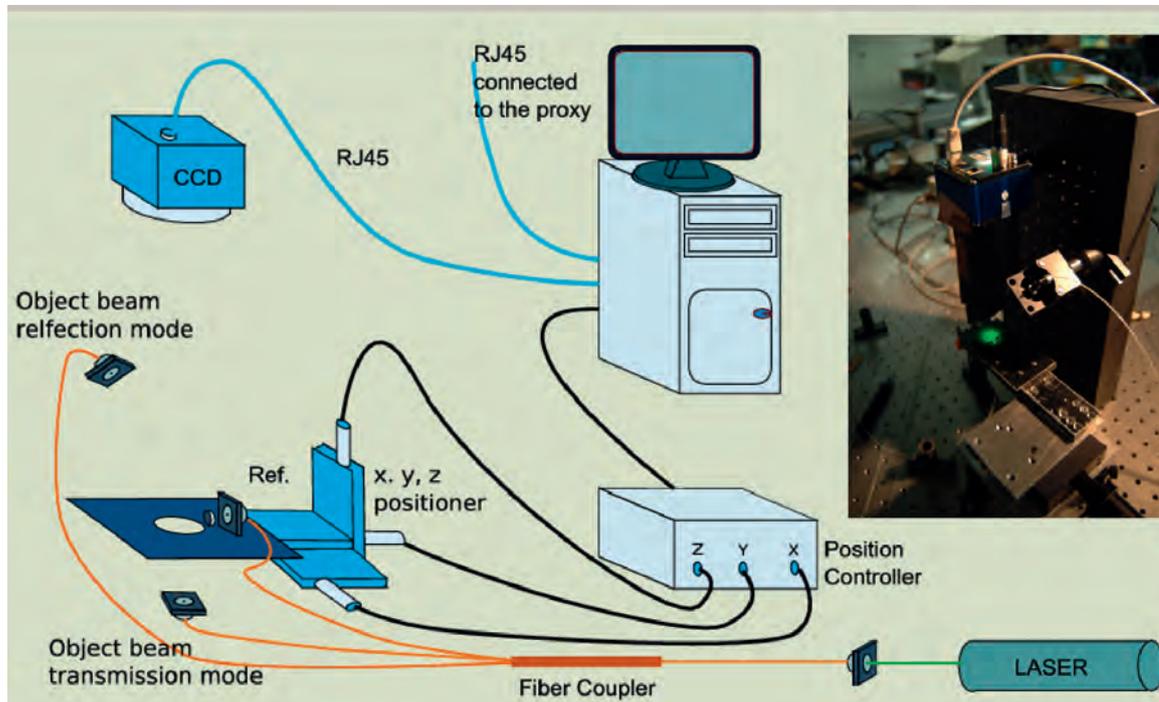


Abb. 2: Hardware für remote digitale Holographie

### 4.3 Lehre heute

#### **Auch die Lehre folgt dem grundsätzlichen Prinzip der Kontinuität und ständigen Weiterentwicklung.**

Hierbei wird, aufbauend auf der bewährten Vermittlung der Optik-Grundlagen, den Studenten Einblick in aktuelle Forschungsthemen am ITO gegeben. Dieser Brückenschlag wird vertieft in zahlreichen Praktika und findet seinen Niederschlag vor allem in Studien- und Diplomarbeiten, die einen wichtigen Beitrag innerhalb der vielfältigen Forschungsprojekte leisten.

Das Vorlesungsangebot umfasst im Studienjahr 2009/10 drei **Kernfächer** und vier Ergänzungsfächer im Rahmen des Hauptfaches „Technische Optik“. Zunächst sollen die Kernfächer kurz dargestellt werden.

#### ■ **Prof. Dr. W. Osten:** **Grundlagen der Technischen Optik**

(WS; Vorl. 2SWS + Übg. 2SWS) Die kollineare Optik; Grundgesetze und Bauelemente: Abbildung durch Linsen, Spiegel, Prismen; optische Grundschaltungen; optische Systeme und Geräte (Auge, Lupe, Mikroskop, Teleskop); Wellenoptik, beugungsbegrenzte Auflösung; geometrische und chromatische Bildfehler und deren Behebung; fotometrische Gesetze.

#### ■ **Prof. Dr. W. Osten / Dr. Körner:** **Optische Messtechnik und Messverfahren**

(wird seit SS 2010 in kompakter Form auch für Bachelor-Studenten angeboten)

(SS; Vorl. 2SWS + Übg. 2SWS) Grundlagen der geometrischen Optik: Gaußsche Optik, Linsengleichungen und -systeme, Blenden; Grundlagen der Wellenoptik: Interferenz, Kohärenz, Beugung und Auflösungsvermögen; Holografie; Speckle; Messfehler; Komponenten optischer Messsysteme: Lichtquellen, Lichtmodulatoren, Auge und Detektoren; geometrisch-optische Messtechniken: Strukturierte Beleuchtung, Moiré, Messmi-

kroskope, Messfernrohre; wellenoptische Messtechniken: Interferometrische Messtechnik, holografische Interferometrie, Speckle-Messtechniken.

#### ■ **Prof. Dr. W. Osten:** **Optische Informationsverarbeitung**

(SS; Vorl. 2SWS + Übg. 2SWS) Fourier-Theorie der optischen Abbildung; Grundlagen der Beugungstheorie, Kohärenz, Frequenzanalyse optischer Systeme; Holografie und Speckle; Spektrumanalyse und optische Filterung; Digitale Bildverarbeitung: Grundbegriffe sowie Methoden und Anwendungen.

Aufbauend auf diesen obligatorischen Kernfächern kann aus folgenden **Ergänzungsfächern** das Hauptfach komplettiert werden.

#### ■ **Dr. K. Frenner:** **Optik dünner und nanostrukturierter Schichten**

(VL seit SS 2009, als Nachfolge der Vorlesung „Optik dünner Schichten, Oberflächen und Kristalle“ von Herrn Apl.-Prof. Dr. K. Leonhardt, von 1981 bis 2008)  
(SS) Polarisation des Lichtes, Interferenz und Kohärenz, Licht an Grenzflächen, Wellenoptik am Computer, Dünne Schichten - Herstellung und Anwendung, Ellipsometrie dünner Schichten, Mikroskopie und Ellipsometrie strukturierter Schichten, Kristalloptik und elektrooptische Komponenten.

#### ■ **Dr. T. Haist: Optische Phänomene in Natur und Alltag** (VL seit SS 2004)

(WS) Besprechung und Erklärung optischer Effekte, die mit bloßem Auge in der Umwelt beobachtbar sind. Eine Auswahl daraus: Schatten und Perspektive, Farbe und Streuung, Sonnenuntergänge, Halos, Luftspiegelungen, Reflexion, Beugungseffekte, Polarisation, Interferenzeffekte, Auge und Wahrnehmung.



Versuch „3D-Vermessung mit Streifenprojektion“ während der Vorlesung „Optische Messtechnik und Messverfahren“



■ **Dr. K. Lenhardt: Grundlagen der Farbmimetrik und Digitale Fotografie**

(Die Vorlesung wird seit dem Studienjahr 1977/78 von Herrn Dr. Lenhardt gehalten, damals war der Titel „Technische Photographie“. Seitdem ist die VL vielfach überarbeitet und aktualisiert worden.)

(SS) Die Charakterisierung und Messung von Farben (= Farbmimetrik) spielt eine entscheidende Rolle bei vielen Medien der visuellen Informationsübertragung, wie z.B. Farbfotografie, Farbdisplays und Farbdruck. Aufbauend auf den Grundlagen der optoelektronischen Bildaufnahme und den Anforderungen an Bildqualität lernen sie insbesondere die farbmimetrischen Eigenschaften der Digitalkameras verstehen.

■ **Dr. C. Menke: Einführung in das Optik-Design**

(VL wird seit SS 2007 von Herrn Dr. Menke gelesen, die Vorgängervorlesung „Auslegung und Berechnung optischer Systeme“ wurde von 1980 - 2006 von Herrn Dr. Zügge gehalten)

(WS) Einführung in die Optikkonstruktion: Strahldurchrechnungen, geometrische und chromatische Aberrationen und Strategien zur Vermeidung von Bildfehlern; Typenübersicht bei optischen Systemen; Systementwicklung.

Die Vorlesung wird durch eine kurze Einführung in das Optik-Design-Programm ZEMAX ergänzt.

Somit haben die Hörer die Gelegenheit, in integrierten Übungen das Erlernte auf einfache Optiksyste (z.B. Handy-Objektiv) anzuwenden.

Zusätzlich können auch folgende Vorlesungen aus dem Angebot weiterer Institute als Ergänzungsfächer gewählt werden:

Dr. U. Brauch: Festkörper- und Halbleiterlaser  
 Prof. Dr.-Ing. J. Burghartz: Design und Fertigung mikro- und nanoelektronischer Systeme  
 Prof. Dr. H. Kück: Mikrotechnik  
 Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe: Aktorik in der Feinwerktechnik

Das erworbene Wissen wird angewandt und vertieft in Hauptfachpraktika. Das Angebot sei hier mit den jeweiligen Titeln aufgelistet:

Im Wintersemester:

- Digitale Bildverarbeitung
- Digitale Speckelfotografie
- Holografische Projektion
- Messung von optischen Spektren
- Rechnerunterstütztes Design optischer Systeme

Im Sommersemester:

- Digitale Holografie
- Ellipsometrie
- Interferometrie
- Mikroskopische 3D Messtechniken
- MTF-Messung von Fotoobjektiven

Dieses Angebot an Vorlesungen, Übungen und Praktika ist in mehreren Diplom-Studiengängen integriert. Zuerst ist hierbei der Studiengang Maschinenwesen zu nennen, aus dem nach wie vor ein Großteil unserer Studenten stammt. Ferner werden die Lehrveranstaltungen aus dem ITO auch zahlreich aus den Studiengängen „Automatisierung in der Produktion“ sowie „Technologiemanagement“ besucht. Besonders zu erwähnen ist

auch die erfolgreiche Einbindung des Fächerkanons in den Studiengang „Technische Kybernetik“, innerhalb dessen wir seit 2005 das Anwendungsfach „Optische Systeme“ anbieten.

Die anerkannte Bedeutung der Technischen Optik während der grundlegenden Umstellung des Diplomstudiums auf das zweistufige Bachelor-Masterkonzept zu festigen, ja auszubauen, ist eine der vordringlichen Zielsetzungen des Instituts. In den Bachelorstudiengängen „Maschinenwesen“, „Mechatronik“ sowie „Technologiemanagement“ und „Technische Kybernetik“ (Start jeweils 2008/09) sind wir nun verstärkt auch in vorgeschriebenen Kernmodulen vertreten. Hier sei vor allem das Fach „Messtechnik II / Optische Messtechnik“ genannt, welches im Sommersemester 2010 zum ersten Mal für die angehenden Kybernetiker gehalten wurde. Dieses Fach wird ab Sommersemester 2011 für die Bachelorstudenten des Maschinenbaus als Modulteil „Messtechnik – Optische Messtechnik“ angeboten. Das Fach „Grundlagen der Technischen Optik“ wird quer durch die oben genannten Bachelorstudiengänge als Kompetenzfeld im jeweiligen Curriculum aufgeführt.

Noch deutlicher nach außen sichtbar wird die Lehre am Institut durch den angestrebten und vorbereiteten Masterstudiengang „Mikrotechnik, Gerätetechnik und Technische Optik“. Dieser Studiengang trägt den überdurchschnittlichen Wachstumsraten auf den Gebieten der Mikro- und Nanotechnik sowie der Technischen Optik und Photonik Rechnung. Ein eigenständiger Master erlaubt die Ausprägung eines klaren fachlichen Profils und wird den Studierenden überdurchschnittliche Berufschancen eröffnen. Geplanter Start dieses Masterstudienganges ist das Wintersemester 2011/12.

Daneben wird natürlich auch die Integration der Ausbildung in Technischer Optik in den neu entstehenden Master-Studiengängen „Maschinenbau“, „Mechatronik“, „Technische Kybernetik“ und „Technologiemanagement“ angestrebt und realisiert.

Zu guter Letzt – ein neues Highlight in der Studienlandschaft: der interuniversitäre Bachelor-Studiengang Medizintechnik der beiden Universitäten Tübingen und Stuttgart.

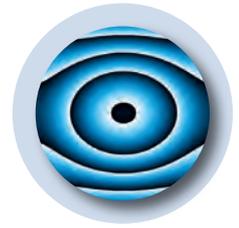
Bisher einmalig in Deutschland werden die Kernkompetenzen der beiden Universitäten – „Medizin“ auf der einen und „Technik“ auf der anderen Seite – kombiniert und dadurch eine exzellente Ausbildung auf dem Gebiet der Medizintechnik angeboten.

Aufbauend auf dem großen Engagement während der Gründungsphase dieses Studienganges, ist es gelungen, das Lehrangebot durch eine neue Stiftungsprofessur der Richtung „Optik-Design und Simulation“ zu bereichern. Hiermit erfüllt sich ein von vielen Seiten lang gehegter Wunsch, dieses gerade auch für die Industrie so wichtige Thema noch stärker in Forschung und Lehre zu integrieren und voranzutreiben.

#### **An dieser Stelle gilt unser besonderer Dank den Stifterfirmen:**

- Berliner Glas KGaA, Herbert Kubatz GmbH & Co; Berlin
- Karl Storz GmbH & Co. KG; Tuttlingen
- Leica Microsystems CMS GmbH; Wetzlar
- Polytec GmbH; Waldbronn
- Sick AG; Waldkirch
- TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH; Ditzingen

# FRINGE



## 4.4 Ausgewählte Veranstaltungen

### FRINGE

**FRINGE 2005** – Die Internationale Konferenz Fringe fand 2005 vom 12. bis 14. September erstmals an der Universität Stuttgart statt. FRINGE steht für Advanced Optical Metrology. Es war der fünfte Workshop im Rahmen der Tagungsreihe, die 1989 durch den Leiter des Instituts für Technische Optik, Prof. Wolfgang Osten, gegründet wurde. Die 140 Teilnehmer aus 26 Ländern gestalteten ein anspruchsvolles Programm, das Stand und Perspektiven des Forschungsbereiches aufzeigte. Schwerpunktthemen waren dabei neue Methoden und Werkzeuge für die Erzeugung, Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von optischen Messdaten, Verfah-

ren zur Verbesserung der Auflösung in den optischen Messtechniken sowie die Anwendung optischer 4D-Messtechniken in weiten Skalenbereichen. Auch hybride Messtechniken sowie neue optische Sensoren und Messsysteme für die industrielle Inspektion wurden diskutiert. Erstmals wurde im Rahmen der Fringe 2005 der Hans-Steinbichler-Preis vergeben. Die mit 5.000 Euro dotierte Auszeichnung ging an Prof. Dr. Johannes Schwider (Erlangen), der durch hervorragende Leistungen sowie zahlreiche Entwicklungen und Publikationen einen bedeutenden Beitrag für die Entwicklung der optischen Messtechnik geleistet hat.



Verleihung Hans-Steinbichler-Preis 2005



Internationales Programmkommittee 2005

**FRINGE 2009** – Vom 14. bis 16. September 2009 fand der 6. Internationale Workshop für "Advanced Optical Metrology" FRINGE 2009 in Nürtingen bei Stuttgart statt. Insgesamt nahmen 228 Teilnehmer aus 32 Ländern teil. Die wesentlichen Schwerpunkte der Tagung waren:

- Neue Methoden und Verfahren für die Generierung, Erfassung, Aufbereitung und Auswertung von Daten in der optischen Messtechnik (Digital Wavefront Engineering).
- Implementierung und Anwendung verbesserter Technologien in der optischen Messtechnik (z.B. verbesserte Auflösung, Zuverlässigkeit und Flexibilität)
- Optische 4D Messtechnik über einen großen Skalenbereich (3D von Makro bis Nano unter Berücksichtigung dynamischer Änderungen)
- Hybride Messtechniken (Sensorfusion und Vereinheitlichung von Modell, Simulation und Experiment)
- Neue Optische Sensoren und Messsysteme für die industrielle Inspektion

Der Hans-Steinbichler-Preis wurde an Dr. Michael Küchel verliehen, auf den zahlreiche Innovationen im Bereich der optischen Messtechnik zurückgehen.

Dr. Küchel ist Inhaber mehrerer Patente, insbesondere auf dem Gebiet der Vermessung optischer Funktionsflächen. Die besondere Fähigkeit des Preisträgers bei der Entwicklung neuer wissenschaftlicher Verfahren und deren Umsetzung in kommerzielle Produkte hat Maßstäbe im auf dem Sektor der hochpräzisen optischen Messtechnik gesetzt.

Prof. Dr. Charles M. Vest, Präsident der National Academy of Engineering USA und Past-President des MIT, hielt die Keynote im Rahmen des Konferenzbanketts im Kloster Maulbronn.

Weitere Informationen: [www.fringe09.de](http://www.fringe09.de)



*Internationales Programmkomitee 2009*



*Verleihung Hans-Steinbichler-Preis 2009*

## SCoPE-Eröffnungsveranstaltung

### – Von den photonischen Grundlagen zur ingenieurwissenschaftlichen Innovation –

Die Universität Stuttgart hat im März 2009 im Rahmen ihres neuen Forschungsprofils ein Forschungszentrum für Photonische Technologien gegründet: SCoPE – Stuttgart Research Center of Photonic Engineering. SCoPE ist das zweite große Forschungszentrum der Universität Stuttgart, das im Ergebnis der neuen Forschungsstrategie gegründet wurde.

Durch SCoPE soll in enger Zusammenarbeit mit der Industrie die Forschungs- und Entwicklungskette von den photonischen Grundlagen zu photonischen Innovationen geschlossen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Physikern und Ingenieuren an der Universität Stuttgart gestärkt werden.

Als einer der Initiatoren hat das ITO im März 2009 SCoPE mit 7 weiteren Instituten gegründet. Mittlerweile umfasst das Forschungszentrum 11 Institute der Universität Stuttgart aus den beiden ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten „Konstruktion-, Produktions- und Fahrzeugtechnik“ sowie „Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik“ und der Physik. Geplant ist, in den nächsten Jahren weitere Institute und Forschungseinrichtungen zu integrieren.

Bei den interdisziplinären Forschungsarbeiten unter dem Dach von SCoPE stehen folgende wissenschaftliche Ziele im Vordergrund:

- Modellierung, Simulation, Herstellung und Charakterisierung von strukturierten photonischen Komponenten mit kritischen Dimensionen im SubWellenlängenbereich,
- Integration photonischer Komponenten in aktive optische Bauelemente und Systeme,
- Modellierung und Implementierung Photon-induzierter und Photon-basierter Prozesse sowie Komponenten für photonische Maschinen unter besonderer Berücksichtigung der Prozesssicherheit im Rahmen des Einsatzes in industriellen Fertigungsprozessen.

Zu einer der wichtigsten Missionen von SCoPE gehört die Steigerung der Exzellenz und Sichtbarkeit des Standorts Stuttgart in den Photonischen Technologien durch die:

- Bündelung der Kompetenzen einzelner Institute,
- Verbesserung der Breite und Kohärenz des Angebots,
- Erhöhung der Außenwirkung,
- Etablierung von mittel- und langfristigen Forschungslinien.

SCoPE hat eine interdisziplinäre und interfakultative Forschungsstruktur, arbeitet mit internationalen und nationalen Forschungspartnern zusammen und kooperiert mit namhaften Industriepartnern, wie z. B. Alcatel-Lucent, Bosch, Daimler, Trumpf und Zeiss.

Am 26. November 2009 wurde SCoPE mit großer Beteiligung aus Industrie, Wissenschaft und Politik in einer Festveranstaltung offiziell gegründet. Neben einer Einführung in die Struktur und Mission von SCoPE beinhaltete das Programm insbesondere die 3 folgenden Festvorträge:

- Photonic crystal fibres: mastering the flow of light  
Prof. Dr. Philip Russell, MPI, Erlangen
- Future Photonic Production – wissenschaftlich-technische und strukturelle Perspektiven eines Schwerpunktes an der RWTH-Aachen  
Prof. Dr. R. Poprawe, FhG ILT, Aachen
- Die Graduiertenschule, „Karlsruhe School of Optics & Photonics“: Ausbildungskonzepte für die Optischen Technologien  
Prof. Dr. U. Lemmer, KSOP Universität Karlsruhe

SCoPE ist nicht nur eine interdisziplinäre Forschungseinrichtung, sondern hat sich inzwischen zu einer teamorientierten interfakultativen Organisation zwischen Physikern und Ingenieuren an der Universität Stuttgart entwickelt. Neben der fachlichen Arbeit kommt insbesondere auch die sportliche Ertüchtigung nicht zu kurz. Bereits Tradition haben die alljährlichen Beach-Volleyballturniere. Das jüngste fand am 3. Juli 2010 statt, wo sich 15 Teams aus 8 an SCoPE beteiligten Instituten auf den Feldern der universitären Sportanlage im sportlichen Wettstreit begegneten. Bei glühender Hitze und vor über 100 gutgelaunten Gästen lieferten sich die Mannschaften packende Duelle. Eine der beiden ITO-Mannschaften konnte in diesem Turnier den 2. Platz erreichen.

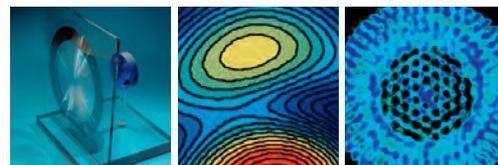
Weitere Informationen zum Forschungszentrum SCoPE: [www.scope.uni-stuttgart.de](http://www.scope.uni-stuttgart.de)



SCoPE-Eröffnungsveranstaltung



Das ITO Beach-Volleyball-Team



## 25. Optik-Kolloquium

**am 10. September 2010:  
50 Jahre ITO - 25. Optik-Kolloquium**

incl. der Kurzfassungen der Vorträge

**Begrüßung**  
**Prof. Dr. Wolfgang Osten**  
**Institut für Technische Optik**  
**der Universität Stuttgart**

**Grußwort**  
**Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel**  
**Rektor der Universität Stuttgart**

**50 Jahre ITO: Wege zum Licht**  
**Prof. Dr. Wolfgang Osten**

Eingebettet in einen kurzen Exkurs in die Geschichte der Optik werden zwei Ereignisse herausgestellt, die die Entwicklung des ITO nachhaltig beeinflusst haben und die 2010 ebenfalls durch einen Jahrestag gewürdigt werden: die Erfindung des Lasers und der Holografie. Davon ausgehend werden wichtige Abschnitte in der 50jährigen Geschichte des Instituts für Technische Optik behandelt und die jeweils herausragenden Forschungsleistungen mit den dafür verantwortlichen Personen in Verbindung gebracht. Daran anschließend soll die der Optik eigene Faszination anhand der aktuellen Forschungsschwerpunkte des Instituts illustriert werden. Besondere Beachtung wird hier der Widmung des Instituts entgegengebracht, die in der gezielten

Verbindung von physikalisch motivierter Grundlagenforschung mit ingenieurtechnischen Anwendungen besteht. Der Beitrag endet mit einem Ausblick in zukünftige Forschungsfelder, deren Licht den Weg des Instituts bereits heute streift.

**Quantum Engineering in der Optik**  
**Prof. Dr. Gerd Leuchs**  
**Gastredner MPI Physik des Lichts**

Viele optische Experimente können bislang sehr gut modelliert werden, ohne dass die Quanteneigenschaften des Lichts berücksichtigt werden müssen. Im Vortrag werden drei Bereiche diskutiert, bei denen Quanten-Effekte zunehmend an Bedeutung gewinnen, bzw. die durch Quanteneffekte erst möglich werden: Die Quantenrauschgrenze optischer Verstärker, die in der Telekommunikation seit einiger Zeit eine Rolle spielt, die Verteilung geheimer Schlüssel für die Kryptographie und das Rauschen der modernen hocheffizienten Photodetektoren. Letzteres betrifft auch die Kameras, bei denen die Quantenausbeute der einzelnen Pixel an 100% heranreicht. Das beobachtete Rauschen ist dann kein intrinsisches Detektorrauschen mehr sondern es ist das Quantenrauschen des Lichts und das kann man manipulieren. Mit letzterer Fragestellung beschäftigt sich das Gebiet des Quantum Imaging.

**Optische Vermessung von Präzisionsoberflächen**  
**Prof. Dr. Michael Küchel, Oberkochen**

Für Interferometer in der Optikfertigung sind Planflächen und Sphären die häufigsten Messobjekte. Heute spielen allerdings asphärische Flächen ebenfalls eine Hauptrolle. Nachdem mich diese Thematik mein ganzes Berufsleben begleitet hat, war es immer dann am

interessantesten, wenn die Grenze des Machbaren erreicht war und man herausfinden wollte, wie sie weiter verschoben werden könnte. Nun, das Problem kann sehr einfach angegangen werden: finde heraus, welche Einflussgrößen die vorderen Plätze im Messunsicherheitsbudget einnehmen und leite die notwendigen Schritte ein, diese zu verkleinern. Meistens funktioniert dieses Rezept recht gut, aber manchmal ist es einfach ökonomisch nicht vertretbar, bzw. nach dem Stand der Technik unmöglich. Dann ist es Zeit, das Gesamtkonzept in Frage zu stellen, erneut über die Messaufgabe nachzudenken und neue Lösungsszenarien durchzuspielen.

Wir wollen das anhand von zwei Beispielen erläutern: im ersten Fall, der schon 25 Jahre zurückliegt, waren die Vibrationen und die Luft in der Interferometer-Cavity als die Problemkandidaten erkannt. Dies führte zum DMI Verfahren (Direkt Messende Interferometrie), wie es dann im DIRECT 100 realisiert wurde. Im zweiten Fall, als wir die Messunsicherheit als eine Funktion der Raumfrequenzen untersuchten, wurde klar, dass das „intrinsische Phasenrauschen“, das von den sehr vielen optischen Flächen im Interferometer herrührt, das Signal / Rausch-Verhältnis in einem weiten Frequenzbereich verdirbt. Es ist weder möglich, die Toleranzen für Feinpassee und Rauheit der optischen Flächen und für die Antireflexschichten weiter zu verschärfen, noch kann die Anzahl der optischen Flächen drastisch vermindert werden. Zwei Erfindungen ergänzen sich hierbei, die dieses Problem einfach und nachhaltig lösen: für die Vorwärtsstreuung der Flächen vermindert eine räumlich inkohärente Lichtquelle in Form eines Ringes (Ring of Fire) durch räumliche Mittelung die zufälligen Phasenbeiträge der optischen Oberflächen, wogegen die Anwendung einer „Doppel-Phasenschiebetechnik“ die Fizeau-Cavity vollständig entkoppelt, und zwar sowohl von der in Rückwärtsstreuung (Reflexion) entste-

henden „Specklewolke“, verursacht von allen Flächen im Beobachtungsarm des Interferometers, als auch den kohärenten Reflexionen (ghosts), die von den Scheitelflächen der Linsen stammen.

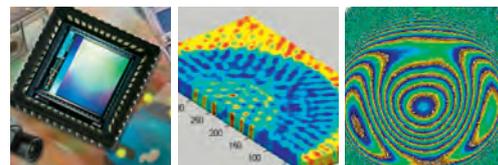
### **Messtechnik für High-End-Optikkomponenten der Lithographie**

**Dr. Bernd Dörband, Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen**

Der Herstellprozess einer Optikkomponente verlangt die Vermessung von Geometrie und Rauheit während der Bearbeitung im Serienprozess. Entsprechende Messtechnik muss produktionstauglich sein und gewährleisten, dass die geforderten Spezifikationen sicher eingehalten werden können. Die Spezifikationen für beugungsbegrenzte optische Systeme leiten sich aus dem Maréchal-Kriterium ab, wonach die Wellenfrontqualität besser als  $\lambda/14$  sein muss. Für lithographische Projektionssysteme, die bei  $\lambda = 193$  nm operieren und etwa 20 bis 25 optische Komponenten - davon Linsen und Spiegel - enthalten, ist dies eine große Herausforderung an die Herstellverfahren. Um konvergente Herstellprozesse zu ermöglichen, darf die Reproduzierbarkeit der Messtechnik maximal 30% der Herstell-Toleranzen betragen.

Entsprechend schwieriger wird die Herstellung von Komponenten für die EUV-Wellenlänge 13,5 nm, bei der die Messtechnik absolute Genauigkeiten im Sub-Ångström-Bereich realisieren muss.

Das Arbeitspferd in der Pässe- und Rauheitsmesstechnik ist traditionell die Interferometrie, vorzugsweise im sichtbaren Spektrum. Zur Anpassung an sphärische und asphärische Flächen kommen passende sphärische Prüfbjektive, refraktive Kompensationsysteme und computer-generierte Hologramme zum Einsatz.



Die Kenntnis über den aktuellen optischen Zustand des Kompensationssystems bildet die Basis für das absolute, systematische Fehlerbudget. Umwelteinflüsse bilden die Gruppe der größten statistischen Fehlerquellen. Subapertur-messende Verfahren bieten die Möglichkeit einer beschränkten Universalität bei der Vermessung von Asphären. Sie verwenden sphärische Prüfoptiken auf Subaperturen und vermessen die asphärischen Abweichungen mit dem Interferometer.

Optische Komponenten erhalten in der Regel – je nach ihrer Funktion – eine reflexmindernde oder hochreflektierende Beschichtung. Beschichtungen können aufgrund von Schichtspannungen die Geometrie verändern oder - bedingt durch Beschichtungsprozesse und innere Struktur – die Oberflächenrauheit beeinflussen. Messtechniken müssen in der Lage sein, auch beschichtete Flächen zu vermessen. Als Ergänzung zu den Rauheitsmesstechniken dient die Messung des Streulichtanteils zur Qualifizierung der Restrauheiten von Substrat und Beschichtung.

Anders als in der Pass- und Rauheitsprüfung muss eine Schichtmesstechnik (Reflektometer, Polarimeter, Ellipsometer etc.) in der Regel für die Gebrauchswellenlänge ausgelegt sein. Die Zielspezifikationen für das spektrale Reflexions- und Transmissionsvermögen der beschichteten Komponenten müssen im Serienprozess abgesichert werden und verlangen eine produktions-taugliche Messtechnik, die jede einzelne Komponente an verschiedenen Messpunkten qualifiziert.

Die großen Herausforderungen bei der Vermessung von optischen Komponenten für lithographische Projektionsobjektive werden überblicksartig erläutert.

## Hochgenaue Messtechniken für die Halbleiterindustrie

**Dr. Jan Liesener, ZYGO Corporation, Middlefield, USA**

Das Messprinzip von Weißlichtinterferometern macht eine enorme Menge optischer Information über ein Objekt zugänglich. Beim klassischen Anwendungsfeld, der Messung flächiger Höhenprofile, sorgt die Auswertung der Phase für interferometrische Genauigkeiten während ein ausgedehnter Wellenlängenbereich Eindeutigkeit in der Höhenbestimmung ermöglicht.

Durch Modifizierung der Abbildungsoptik eines Weißlichtinterferometers werden die zwei Dimensionen der Ortsauflösung aufgegeben und dafür zwei Winkeldimensionen gewonnen. Bei entsprechender Auswertung der Messdaten liegt die optische Antwort des Objekts dann als Reflektionsgrad, aufgeschlüsselt nach Wellenlängen, Einfallswinkel und Azimuth vor, wobei der Reflektionsgrad sowohl Amplituden als auch Phaseninformation beinhaltet. Dimensionelle Messungen werden so zu einem inversen Problem bei dem optische Simulation im Mittelpunkt steht.

Der Vortrag zeigt auf, wie wir durch Anpassung und Integration der optischen Simulationssoftware des ITO (MICROSIM) in der Lage waren, weißlichtinterferometrische Daten eines ZYGO Interferenzmikroskops zu interpretieren und dadurch Dimensionen, Formen und Schichtdicken in Halbleiterbauteilen zu messen, die 22 nm klein sind.

**Optische Messtechnik –  
Perspektiven aus Zeiss-Sicht  
Dr. Michael Totzeck, Carl Zeiss AG, Oberkochen**

Optische Messtechnik nutzt Licht, um quantitative Informationen über Messobjekte zu erlangen, wie z.B. Form, Oberflächenrauheit, Struktur oder materielle Zusammensetzung. Der genutzte Spektralbereich ist dabei nicht mehr auf das Sichtbare beschränkt, sondern umfasst das Band zwischen dem tiefen UV und der Terahertz-Strahlung, also Wellenlängen zwischen 10nm und einigen 100µm.

Die Vorteile optischer Messungen liegen auf der Hand: – Große Messgeschwindigkeit bedingt durch parallele Datenaufnahme bzw. große Scanraten; – die Messungen erfolgen berührungsfrei, d.h. es werden keine Kräfte auf das Messobjekt übertragen, – und eine hohe Empfindlichkeit. So ist die optische Messtechnik heute in der Lage, große Flächen und Volumina einerseits sowie kleinste Mikro- und Nanostrukturen andererseits zu vermessen, und damit geometrische Maße von Objekten über viele Größenordnungen zu gewinnen. Eine Herausforderung ist dabei die Verarbeitung der anfallenden großen Datenmengen. Lücken gibt es auch bei Verfahren und Methoden, mit denen sich Mikro- und Nanostrukturen in makroskopischen Volumina messen und die in unterschiedlichen Skalenbereichen gewonnenen Daten zueinander in Bezug setzen lassen. Eine weitere Herausforderung ist schließlich, dass die optische Messung nicht notwendigerweise die funktionale, wirkende Oberfläche abbildet, z.B. bei Getriebeteilen. Hier muss die Rückführbarkeit auf die wirkende Oberfläche gezeigt werden; auf wissenschaftlicher Seite durch ein vertieftes Verständnis der physikalischen Licht-Struktur Wechselwirkung und auf technischer Seite durch geschickte Kalibrationsverfahren.

Bereits in der Vergangenheit wurde die optische Messtechnik entscheidend durch technologische Fortschrit-

te geprägt. Insbesondere die Entwicklung des Lasers und die elektronische Bildaufnahme und -verarbeitung hatten einen starken Einfluss. Aktuelle Fortschritte in den Lichtquellen wirken sich auf die Messtechnik aus: kompakte fs-Laser, Frequenzkämme mit  $<10^{-16}$  Frequenzstabilität,  $>100\text{nm}$  durchstimmbare Laser und Superkontinuumslichtquellen, die ein kontinuierliches Spektralgebiet vom UV bis in das IR abdecken. Auf der Auswertungsseite führt die anhaltende Steigerung der Rechenleistung zu einer verstärkten Einbindung der Software bis hin zur Echtzeitauswertung. Die Siliziumbasierte Mikromechanik wie MEMS und MOEMS Devices ermöglicht die Herstellung kompakter Komponenten und Systeme. Inzwischen können ganze Systeme, wie z.B. Spektrometer, als eine miniaturisierte Komponente erstellt werden.

In Summe bleibt festzuhalten, dass optische Verfahren einen entscheidenden Baustein der industriellen Messtechnik bilden. Wir erwarten, dass die laufenden technologischen Weiterentwicklungen, insbesondere der Lichtquellen, Mikrosystemtechnik und Rechenleistung, die schon vorhandene Vielseitigkeit der optischen Messtechnik verstärken und damit entscheidend zur Erschließung weiterer Applikationen beitragen werden.

**Future 3D-Vision  
Dr. Stephan Reichelt, SeeReal Technologies,  
Dresden**

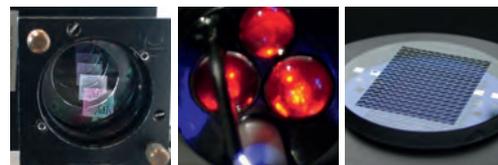
Dynamische Echtzeit-Holographie wird als die ultimative 3D Display-Technologie der Zukunft angesehen. Im Gegensatz zu stereoskopischen Displays, die beiden Augen flache, zweidimensionale Bilder mit zwar unterschiedlicher Perspektive darbieten und dadurch einen räumlichen Eindruck suggerieren, stellen holographische Displays all jene Tiefeneindrücke bereit, die auch natürliche Objekte liefern würden. Insbesondere er-



möglichen holographische Displays die Akkommodation des Auges auf Objekte, welche in unterschiedlichen Entfernungen rekonstruiert werden. Dadurch wird ein entspanntes Sehen gewährleistet.

Die Integration des elektro-holographischen Prinzips in die Display-Technologie ist eine der vielversprechenden aber auch herausfordernden Entwicklungen für den zukünftigen Display-Markt. Zwei Anforderungen der klassischen Holographie haben bisher die kommerzielle Realisierung von großen holographischen Echtzeit-Displays verhindert: (1) das erforderliche Space-Bandwidth-Product (Pixel im Submikrometerbereich über große Displayformate) und (2) die damit verbundene enorme Rechenkapazität, die notwendig wäre, um alle Pixel eines solchen klassischen Hologramms zu berechnen. SeeReal hat einen neuartigen Ansatz für die Echtzeit-Holographie entwickelt, der darauf basiert, nur die für den Betrachter relevante Information holographisch zu erzeugen (Sub-hologram encoding principle) und diese entsprechend der Betrachterposition im Raume nachzuführen (tracked Viewing-Window technology). Das holographische Display vereint eine maßgeschneiderte holographische Aufzeichnung mit einer aktiven Betrachternachführung der holographischen Rekonstruktion. Dieser einzigartige Ansatz reduziert drastisch den Bedarf des erforderlichen Space-Bandwidth-Products, wodurch räumliche Lichtmodulatoren mit handelsüblicher Pixelauflösung eingesetzt werden können, deren Pixel als Träger der Hologramminformation in Echtzeit berechnet werden können. Große interaktive 3D Displays werden dadurch möglich.

Die Grundlagen und Herausforderungen dieser holographischen 3D Display-Technologie werden beschrieben, ihre Umsetzung in Prototypen nachgewiesen und die guten Aussichten für den 3D-Display-Markt diskutiert.



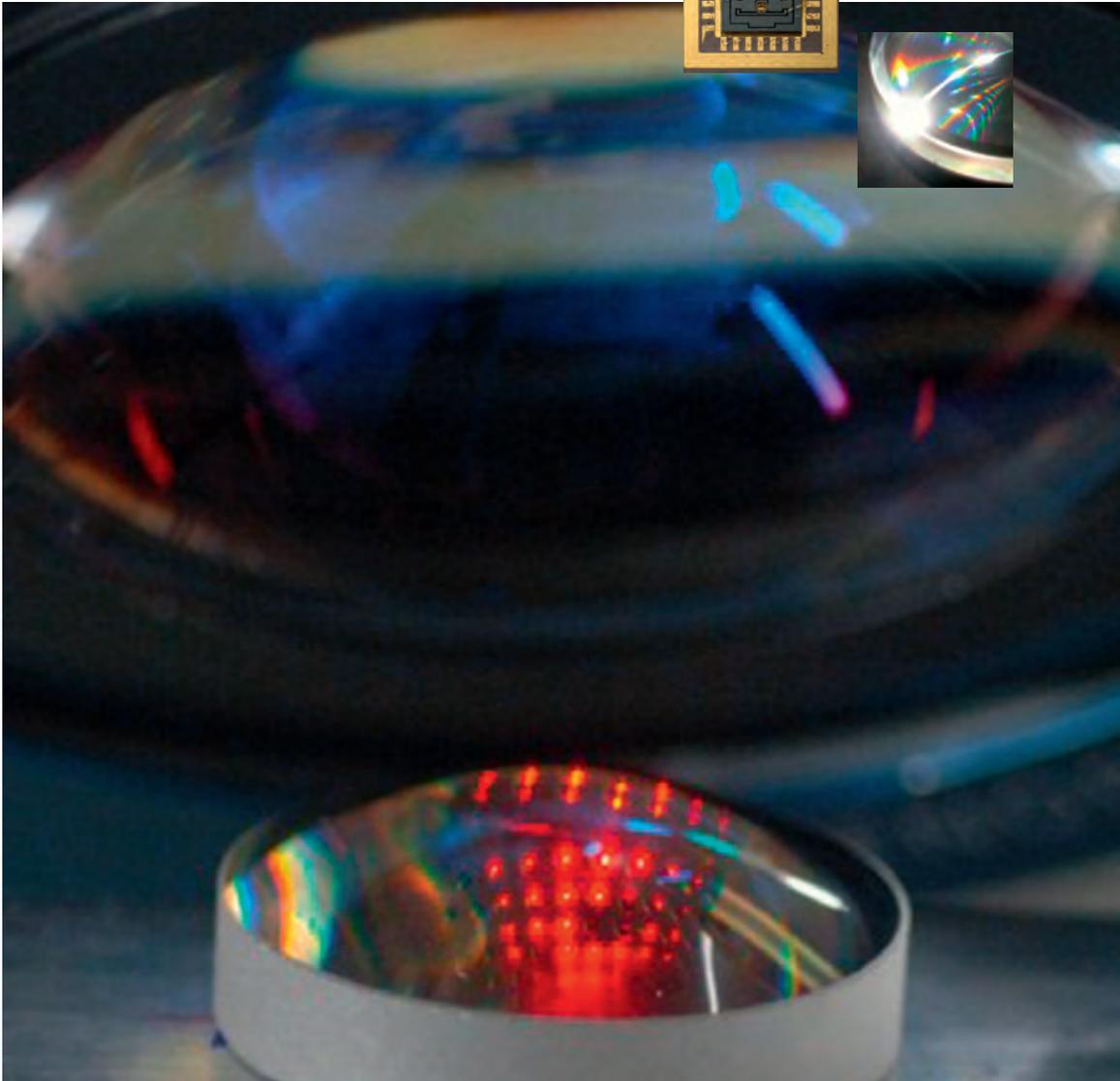
### **Die Rolle von Intellectual Property (IP) in der Optik Dr. Robert Windecker, Europäisches Patentamt, München**

Im Rahmen einer Welt globalen Wettbewerbs spielt der Schutz geistigen Eigentums eine zunehmend wichtige Rolle. Dies gilt insbesondere auch für einen exportorientierte Industriesektor, wie man ihn bei den optischen Technologien vorfindet.

Für technische Entwicklungen sind hierbei seit Anbeginn der Industrialisierung Patente das Mittel der Wahl, um im Gegenzug zur Veröffentlichung der erfindnerischen Idee ein zeitlich limitiertes Monopol zu bekommen.

In den Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen ist dies zwar grundsätzlich bekannt, trotzdem bleibt die Welt der Patente für viele Forscher und Entwickler eine parallele Welt mit vielen Rätseln und Unbekannten. Dieser Vortrag soll helfen ein wenig Licht in diese Parallelwelt zu bringen, indem die Grundzüge des Europäischen Patenterteilungs-Verfahrens gerade im Hinblick auf optische Technologien erläutert werden und indem die verschiedenen Möglichkeiten, aber auch Grenzen aufgezeigt werden, um seine Erfindung zu schützen.

Darüber hinaus sollen aktuelle Entwicklungen im Patentwesen angesprochen werden.



# 5

## 50 Jahre ITO – Kompakt

### 5.1 ITO – Mitarbeiter 1960 -2010

Die nachfolgende Liste aller am ITO angestellten Mitarbeiter ist aus den Jahresberichten der Jahre 1969 bis 2008 entstanden, ergänzt durch die ersten Absolventen, die unter Prof. Dr. R. Schulze erfolgreich promovierten.

Der jeweilige Titel richtet sich nach dem heutigen Stand (30.6.2010).

Sollten wir trotz gründlicher Recherche jemanden übersehen haben, bitten wir um Verständnis.



Dr. Igor Alekseenko • Ralf Ameling • Peter Anders • Dr.-Ing. Friedrich Aurin • Nicole Bach • Jochen Bahnmüller • Dr.-Ing. Martin Bantel • Peng Bao • Mike Bartelt • Klaus Behrendt • Reinhard Berger • Heiko Bieger • Bartosz Bilski • Doris Boebel • Harald Bollmann • Katharina Bosse-Mettler • Petra Brüning • Dr. rer.nat. Christel Budzinski • Avinash Burla • Dr.-Ing. Jehng-Huei Chen • Katja Costantino • Dr.-Ing. Michael Daffner • Dr.-Ing. Ernst Dalhoff • Roland Dederer • Susanne Demel • Georg Diem • Dr.-Ing. Bernd Dörband • Claus Dreher • Dr.-Ing. Manfred Dreher • Ulrich Droste • Ruth Edelmann • Dr.-Ing. Mohamed El Bahrawi • Veysel Erdogan • Inge Erlenhardt • Ahmad Faridian • Valeriano Ferreras Paz • Dr.-Ing. Edgar Fischer • Dr.-Ing. Matthias Fleischer • David Fleischle • Sandro Förster • Dr.-Ing. Stefan Franz • Dr.-Ing. Bernhard Franze • Dr.-Ing. Karsten Frenner • Uli Frey • Dr.-Ing. Philipp Fröning • Eugenio Garbusi • Ralf Gärtner • Dr.-Ing. Hansjörg Gärtner • Holger Gilberts • Prof. Dr. Günther Glaser • Anderas Goretzky • Dr.-Ing. Witold Gorski • Gabriele Großhans • Dr.-Ing. Roger Groves • Joachim Habisreuther • Dr.-Ing. Detlev Hadbawnik • Matthias Häfner • Dr.-Ing. Pascal Haible • Dr.-Ing. Tobias Haist • Dr.-Ing. Sen Han • Malte Hasler • Eleonore Haun • Dr.-Ing. Christoph Haupt • Dr.-Ing. Günter Hege • Dr.-Ing. Hans Heinrich • Dr.-Ing. Christian Hembd-Söllner • Dr.-Ing. Fromund Hock • Dr.-Ing. Ulrich Hofbauer • Dr.-Ing. Frank Höller • David Hopp • Dr.-Ing. Peter Horn • Thomas Ittner • Sebastian Jackisch • Dr. rer. nat. Harald Jacobsen • Erwin Jäger • Dr. Gerald Jahn • Dr. rer.nat. Thomas Jensen • Dr.-Ing. Hans Joachim Jordan • Ute Kaden • Gabriele Kalmbach • Dr.-Ing. Jochen Kauffmann • Dr.-Ing. Norbert Kervien • Jürgen Klenk • Ralph Knoll • Dr.-Ing. Christian Kohler • Hiltrud Kolberg • Dr.-Ing. Gerhard Kolbert • Dr.rer.nat. Jens Korallus • Dr.-Ing. Klaus Körner • Dr.rer.nat. Victor Korolkov • Wolf Krause • Michael Kremer • Silke Kreuz • Stefanie Krug • Rosemarie Küchel • Dr.-Ing. Michael Küchel • Achim Kühfuß • Edith Lacroix • Dr.-Ing. Peter Langenbeck • Dr.-Ing. Peter Lehle • Dr.-Ing. Fang Lei • Dr.-Ing. Karl Lenhardt • Apl.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Leonhardt • Dr.-Ing. Jan Liesener • Reinhold Litschel • Andreas Lorenz • Karl-Anton Lutz • Dr.-Ing. Giang-Khanh Ly • Wolfram Lyda • Jun Ma • Dr. Steffen Maisch • Michael Maisl • Florian Mauch • Dr.-Ing. Reinhard Malz • Quoc-Khanh Nguyen • Jean-Marc Nivet • Dr.-Ing. Hans-Anton Obermayer • Prof. Dr. Wolfgang Osten • Dr.-Ing. Bernd Packroß • Dr.-Ing. Michael Pahlke • Dr.-Ing. Evangelos Papastathopoulos • Michael Pascherat • Dr.-Ing. Giancarlo Pedrini • Martin Peglow • Sebastian Pehnelt • Sandy Peterhänsel • Dr.-Ing. Berthold Pfister • Ingrid Pöschel • Dr.-Ing. Klaus-Peter Proll • Christof Pruss • Stephan Rafler • Dr.-Ing. Stephan Reichelt • Dr.-Ing. Marcus Reicherter • René Reichle • Dr.-Ing. Siegfried Reiniger • Susanne Reuter • Margarita Riedel • Dr.-Ing. Karl-Heinz Rippert • Dr.-Ing. Martin Rocktäschel • Dr.-Ing. Andreas Rothe • Dr.-Ing. Aiko Ruprecht • Frederik Schaal • Philipp Schau • Ralf Schaufuß • Uwe Schellhorn • Ute Schenke • Dr.-Ing. Ulrich Schilling • Bernd Schmidt • Dr.-Ing. Gerhard Schmidt • Ingrid Schneider • Dr. Burkhard Schnell • Thomas Schoder • Inge Schökle • Dr.-Ing. Martin Schönleber • Prof. Dr. Reinhart Schulze • Dr.-Ing. Thomas Schuster • Xavier Schwab • Andreas Schwarz • Dr.-Ing. Lars Seifert • Dr.-Ing. Karl-Günther Seitz • Christine Selig • Dr. rer.nat. Wolfgang Singer • Dr. Guohai Situ • Dr.-Ing. Zoran Sodnik • Erich Steinbeißer • Daniela Steudle • Dr.rer.nat. Alexander Tavrov • Prof. Dr. Hans Tiziani • Dr.-Ing. Reimund Torge • Dr. habil. Michael Totzeck • Dr.-Ing. Hans-Martin Uhde • Ronald Valentine • Dr.-Ing. Herbert Vetter • Christoph Voland • Dr.-Ing. Ernst Ulrich Wagemann • Dr. rer.nat. Andreas Wappelt • Michael Warber • Dr.-Ing. Michael Wegner • Walter Weismann • Johann Westhauser • Paul Wieland • Tobias Wiesendanger • Dr.-Ing. Robert Windecker • Dr.-Ing. Johann Wöhler • Christa Wolf • Albrecht Zeller • Dr. Fucai Zhang • Christoph Zinn • Dr.-Ing. Yunlu Zou • Olga Zvyagolskaya • Hubert Zwick • Susanne Zwick

## 5.2 Dissertationen 1960 – 2010

Im Folgenden sind die Dissertationen aufgeführt, bei denen Herr Prof. Dr. R. Schulze, Herr Prof. Dr. H. Tiziani oder Herr Prof. Dr. W. Osten Hauptberichter waren. Die Doktorarbeiten sind nach dem Jahr der Drucklegung sortiert.

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Hauptberichter</b>	<b>Jahr</b>
Bantel, Martin	Beeinflusst die Spiegelbewegung die Bildschärfe in der Spiegelreflexkamera?	Prof. Dr. R. Schulze	1969
Torge, Reimund	Beitrag zur Theorie und Methodik interferometrischer Kompensationsverfahren	Prof. Dr. R. Schulze	1970
Wöhler, Johann Friedrich	Prüfung asphärischer optischer Flächen durch interferometrische Methoden	Prof. Dr. R. Schulze	1970
Heinrich, Hans	Abbildung durch lineare Übertragungssysteme endlicher Breite	Prof. Dr. R. Schulze	1971
Dreher, Manfred	Die Profilprojektion gewölbter Flächen im Hinblick auf einen Fehler bei der Messung des Teilflankenwinkels von Schraubenflächen	Prof. Dr. R. Schulze	1973
Leonhardt, Klaus	Kontrast, Helligkeit und Streifenversetzung in Interferometern mit unterschiedlich polarisierten Teilstrahlen	Prof. Dr. R. Schulze	1973
Reiniger, Siegfried	Photometrisches Messen von Vickers-Härteeindrücken	Prof. Dr. R. Schulze	1973
Horn, Peter	Wischfestigkeit optischer Gläser	Prof. Dr. R. Schulze	1974
Hadbawnik, Detlev	Holographische Aufnahmetechniken für die Endoskopie	Prof. Dr. R. Schulze	1975
Obermayer, Hans-Anton	Interferometrische Herstellung von reflektierenden Beugungsgittern mit hohem Wirkungsgrad und Untersuchung ihrer Eigenschaften	Prof. Dr. R. Schulze	1976
Aurin, Friedrich	Über eine neue Methode zur automatischen Ansatzfindung und Berechnung superachromatischer Objektive	Prof. Dr. R. Schulze	1977
Hock, Fromund	Photoelektrische Messung der Änderung von Längen oder Winkelpositionen mit Hilfe von Beugungsgittern	Prof. Dr. R. Schulze	1977
El Bahrawi, Mohamed	Untersuchung einer Gruppe von Zweistrahlinterferometern mit Retroreflektoren	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1979
Lenhardt, Karl	Geometrische Aspekte der Polarisation und deren Anwendungen auf Zweistrahlinterferenzen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1982

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Hauptberichter</b>	<b>Jahr</b>
Küchel, Michael	Zwei-Wellenlängen-Konturlinienholographie in der Meßtechnik	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1983
Hege, Günther	Entwicklung eines neuen Speckleverfahrens zur berührungslos optischen Abstandsmessung von rauen Oberflächen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1984
Dörband, Bernd	Analyse optischer Systeme mit Hilfe von automatischer Streifenbewertung und Strahldurchrechnung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1986
Höller, Frank Stefan	Einsatz photorefraktiver Kristalle in der optischen Bildverarbeitung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1988
Sodnik, Zoran	Photothermische Interferometrie zur zerstörungsfreien Materialprüfung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1990
Rippert, Karl-Heinz	Optische Mikroprofilometrie	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1990
Seitz, Karl-Günther	Lasergestützte Triangulationsmeßverfahren für Produktions- und Montageanwendungen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1991
Lei, Fang	Untersuchung der Bildübertragungskette und Beurteilung der Bildqualität im Fern- und Nahbereich	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1991
Uhde, H.M.	Chromatische Höhenbestimmung mit dem konfokalen Mikroskop	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1992
Malz, Reinhard	Codierte Lichtstrukturen für 3D-Meßtechnik und Inspektion	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1992
Packroß, Bernd	Interferometrie mit Laserdioden zur Form- und Abstandsmessung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1992
Kolbert, G.	Untersuchung der thermischen Belastung von optischen Komponenten	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1993
Pfister, Berthold	Speckleinterferometrie mit neuen Phasenschiebemethoden	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1993
Ly, Giang Khanh	Meßverfahren zur makro- und mikroskopischen Oberflächentopographiebestimmung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1994
Fischer, Edgar	Doppelheterodyn-Interferometrie zur Profil- und Abstandsmessung an optisch rauen Oberflächen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1994
Schmidt, Gerhard	Formprüfung von Asphären mit flächenhaften interferometrischen Verfahren	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1996

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Hauptberichter</b>	<b>Jahr</b>
Zou, Yunlu	Speckleinterferometrie zur Topografiebestimmung an optisch rauhen Oberflächen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1996
Rothe, Andreas	Vermessung asphärischer Flächen mit einem Heterodyn-Differential-Interferometer	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1996
Haupt, Christoph	Computergenerierte Hologramme zur Strahlformung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1996
Chen, Jehng-Huei	Schnelle Wellenfrontmessung an CO <sub>2</sub> - Lasern	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1996
Jordan, Hans-Joachim	Optische Mikrotopometrie und Rauheitsmessung an technischen Oberflächen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1996
Schilling, Ulrich Christian	Absolute Positionserfassung mit Gitterinterferometern	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1997
Han, Sen	Kombiniertes Heterodyninterferometer zur eindeutigen Messung von Bewegungen mit hoher Dynamik	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1997
Hembd-Söllner, Christian	Strahldiagnostik von CO <sub>2</sub> - Hochleistungslasern mit diffraktiver Optik	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1997
Windecker, Robert	Optische Topometrie im Grenzbereich zwischen mikroskopischer und makroskopischer Vermessung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1998
Lehle, Peter	Dynamische und Strukturierte Beleuchtung für die optische Meßtechnik	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1998
Franze, Bernhard	Formmessung basierend auf Interferometrie mit durchstimmbaren Laserdioden	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1998
Dalhoff, Ernst	Interferometrische Distanzmessung mit synthetischen Wellenlängen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1998
Gärtner, Hansjörg	Quantitative 3D-Vermessung mit Codierter Beleuchtung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1998
Schönleber, Martin	Optische Inspektion mit Flüssigkristall-Lichtmodulatoren	Prof. Dr. H.J. Tiziani	1999
Pahlke, Michael	Auslegung hocheffizienter, computergenerierter Beugungsstrukturen zur Strahlformung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2000
Haible, Pascal	Zeitliche Auswertung von Speckle-Modulationen zur Topometrie und Deformationsmessung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2001
Wegner, Michael	Konfokale Mikroskopie zur Topografiebestimmung technischer Oberflächen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2002
Haist, Tobias	Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren zur Defekt- und Mustererkennung	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2002
Hofbauer, Ulrich	Zweiwellenlängeninterferometrie mit Laserdioden	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2002
Rocktäschel, Martin	Wellenfrontanalyse mittels diffraktiver optischer Elemente	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2003
Daffner, Michael	Asphärische Korrekturlemente zur Strahlformung von Leistungslaserdioden	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2003
Fleischer, Matthias	Signalverarbeitung in der optischen Messtechnik	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2003

<b>Autor</b>	<b>Titel</b>	<b>Hauptberichter</b>	<b>Jahr</b>
Reichelt, Stephan	Interferometrische Optikprüfung mit computergenerierten Hologrammen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2004
Proll, Klaus-Peter	Optische Topometrie mit räumlichen Lichtmodulatoren	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2004
Vetter, Herbert	Verformungsmessung mit gestörten Interferogrammen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2005
Franz, Stefan	Optische Vermessung von Bohrungen	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2005
Liesener, Jan	Zum Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren in der interferometrischen Wellenfrontmessung	Prof. Dr. W. Osten	2007
Reicherter, Marcus	Einsatz von Lichtmodulatoren zum Teilcheneinfang und zur Aberrationskontrolle in holografischen Pinzetten	Prof. Dr. W. Osten	2007
Kerwien, Norbert	Zum Einfluss von Polarisierungseffekten in der mikroskopischen Bildentstehung	Prof. Dr. W. Osten	2007
Ruprecht, Aiko	Konfokale Sensorik zur Hochgeschwindigkeits-Topografiemessung technischer Objekte	Prof. Dr. H.J. Tiziani	2008
Kauffmann, Jochen	Rigorese Rekonstruktionsmethoden der optischen Messtechnik zur tomographischen und diffraktometrischen Bestimmung von Struktur-Stoff-Systemen	Prof. Dr. W. Osten	2008
Seifert, Lars	Flexible Verfahren zur Vermessung asphärischer Flächen	Prof. Dr. W. Osten	2009
Kohler, Christian	Optimierung von Flüssigkristall-Lichtmodulatoren in aktiven optischen Systemen	Prof. Dr. W. Osten	2009
Schuster, Thomas	Simulation von Lichtbeugung an Kreuzgitterstrukturen und deren Anwendung in der Scatterometrie	Prof. Dr. W. Osten	2010
Jackisch, Sebastian	Ein Beitrag zur interferometrischen Vermessung överschmutzter Funktionsflächen	Prof. Dr. W. Osten	2010
Zwick, Susanne	Flexible Mikromanipulation durch räumliche Lichtmodulation in der Mikroskopie	Prof. Dr. W. Osten	2010

### 5.3 Patente

Erteilte Schutzrechte mit Beteiligung von ITO-Mitarbeitern, gelistet nach dem Jahr der Erteilung (Stand 30.06.2010)

#### 1983

1. Leonhardt, Klaus: Device for contactless gauging of surface roughness  
Britisches Patent GB 2 149 499 B,  
Anmeldetag: 11.11.1983  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
28.10.1987  
Anmelder: Universität Stuttgart

#### 1988

2. Leonhardt, Klaus: Gerät und Verfahren zur berührungslosen Prüfung der Oberflächengüte und zur Messung der Oberflächenrauheit  
Deutsches Patent DE 30 20 044 C2,  
Anmeldetag: 24.05.1980  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
11.08.1988  
Patentinhaber: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

#### 2005

3. Liesener, Jan; Pruss, Christof: Schaltbares Punktlichtquellen-Array und dessen Verwendung in der Interferometrie  
Deutsches Patent DE 103 25 601 B3 2005.01.13,  
Anmeldetag: 5.6.2003  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
13.01.2005  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
4. Freimann, Rolf; Mayer, Maximilian; Reichelt, Stephan: Method for absolute Calibration of an Interferometer  
USA-Patent US 6,940,607 B2,  
Anmeldetag: 21.05.2002 (Filed)  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
06.09.2005  
Patentinhaber: Carl Zeiss SMT AG

**2006**

5. Körner, Klaus; Berger, Reinhard; Droste, Ulrich; Kohler, Christian; Osten, Wolfgang; Pruss, Christof; Ruprecht, Aiko; Wiesendanger, Tobias: Interferometrisches, konfokales Verfahren und interferometrische, konfokale Anordnung für optische Datenspeicher, insbesondere Terabyte-Volumenspeicher  
Deutsches Patent DE10 2005 006 723 B3  
2006.06.08, Anmeldetag: 03.02.2005  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
08.06.2006  
Patentfamilie  
Verfahren und Anordnung zur konfokalen, chromatischen, interferometrischen, spektroskopischen Abtastung für optische Mehrlagedatenspeicher  
Europäisches Patent EP 1 846 923 B1  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
08.04.2009  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
  
6. Franz, Stefan; Windecker, Robert: Measuring Device for Detecting the Dimensions of Samples  
USA-Patent US 7,092,102 B2,  
Anmeldetag: 15.06.2001 (PCT Filed)  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
15.08.2006  
Patentfamilie  
Messeinrichtung zur Erfassung von Prüflingen sowie Verfahren unter Verwendung der Messeinrichtung  
Europäisches Patent EP 1 018 631 B1 2007.03.07  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
07.03.2007  
Patentinhaber: Fa. Joh. & Ernst Link GmbH & Co. KG

**2007**

7. Körner, Klaus; Papastathopoulos, Evangelos; Berger, Reinhard; Osten, Wolfgang: Verfahren und Anordnung zur Spektral-Interferometrie mit chromatischer Tiefenaufspaltung, insbesondere auch Mirau-Interferometer  
Deutsches Patent DE 10 2005 042 733 B3  
2007.01.25, Anmeldetag: 05.09.2005  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
25.01.2007  
Patentfamilie  
Körner, Klaus; Berger, Reinhard; Droste, Ulrich; Kervien, Norbert; Kohler, Christian; Osten, Wolfgang; Papastathopoulos, Evangelos; Pruss, Christof; Ruprecht, Aiko; Wiesendanger, Tobias: Interferometrisches Verfahren und Anordnung  
Europäisches Patent EP 1 805 477 B1  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
08.04.2009  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
  
8. Körner, Klaus; Papastathopoulos, Evangelos; Osten, Wolfgang: Anordnung und Verfahren zur konfokalen Durchlicht-Mikroskopie, insbesondere auch zur Vermessung von bewegten Phasenobjekten  
Deutsches Patent DE 10 2006 023 887 B3  
2007.08.23, Anmeldetag: 23.08.2007  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
23.08.2007  
Patentinhaber: Universität Stuttgart

9. Reichle, René; Pruss, Christof; Zimmermann, Frank; Schulz, Christof: Optischer Sensor und Zündkerze mit optischem Sensor und Detektionskaskade  
Deutsches Patent DE 10 2005 028 113 B4  
2007.08.30, Anmeldetag:13.06.2005  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
30.08.2007  
Patentinhaber: Landesstiftung  
Baden-Württemberg gGmbH

## 2008

10. Osten, Wolfgang; Garbusi, Eugenio; Pruss, Christof; Liesener, Jan: Verfahren und Messvorrichtung zur Vermessung einer optisch glatten Oberfläche  
Deutsches Patent DE 10 2006 057 606 B4  
2008.12.11, Anmeldetag: 24.11.2006  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
11.12.2008  
Patentinhaber: Universität Stuttgart

## 2009

11. Lehmann, Peter; Lücke, Peter; Mohr, Jürgen; Morgan-Iglesias, Javier Carlos; Osten, Wolfgang; Ruprecht, Aiko; Schönfelder, Sven:  
Optical Measuring Head  
USA-Patent US 7,486,394 B2,  
Anmeldetag: 02.09.2006 (Filed)  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
03.02.2009  
Patentinhaber: Carl-Mahr Holding GmbH
12. Górski, Witold, Marek; Osten, Wolfgang:  
Optisches Abbildungssystem und Verfahren zum Ermitteln dreidimensionaler Amplituden- und/oder Phasenverteilungen  
Deutsches Patent DE 10 2007 036 309 B4  
2009.09.03, Anmeldetag: 31.07.2007  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
03.09.2009  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
13. Körner, Klaus; Kohler, Christian; Papastathopoulos, Evangelos; Osten, Wolfgang: Verfahren und Anordnung zur schnellen und robusten chromatisch-konfokalen 3D-Messtechnik  
Deutsches Patent DE 10 2006 007 170 B4  
2009.06.10, Anmeldetag:08.02.2006  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
10.06.2009  
Patentfamilie  
Europäisches Patent EP 1 984 770 B1  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
09.09.2009  
Patentinhaber: Sirona Dental Systems GmbH

**2010**

14. Ruprecht, Aiko: Optisches Detektionsverfahren  
mittels Vielstrahlinterferenz  
Deutsches Patent DE 10 2007 030 814 B4  
2010.02.11, Anmeldetag: 03.07.2007  
Veröffentlichungstag der Patenterteilung:  
11.02.2010  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
  
15. Körner, Klaus; Lyda, Wolfram, Osten, Wolfgang:  
Anordnung und Verfahren zur konfokalen,  
spektralen Zweistrahl-Interferometrie  
Deutsches Patent DE 10 2008 020 902,  
Anmeldetag: 18.04.2008  
Tag des Erteilungsbeschlusses: 11.02.2010  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
  
16. Körner, Klaus; Osten, Wolfgang: Sensor zur  
Erfassung der Topografie mit einem  
Zweistrahl-Interferometer  
Deutsches Patent DE 103 21 895,  
Anmeldetag: 07.05.2003  
Tag des Erteilungsbeschlusses: 15.04.2010  
Patentinhaber: Universität Stuttgart
  
17. Körner, Klaus; Osten, Wolfgang: Verfahren und  
Anordnung zur skalierbaren Interferometrie  
Deutsches Patent DE 10 2008 062 879,  
Anmeldetag: 15.12.2008  
Tag des Erteilungsbeschlusses: 25.05.2010  
Patentinhaber: Universität Stuttgart

## 5.4 Optik-Kolloquien seit 1984

Datum	Titel	Nr.
26.01.1984	Verfahren und Anwendungen der optischen Messtechnik	1
12.02.1986	Optische Messtechnik Schwerpunkte: Formerkennen, Formvergleich, dimensionelles Messen	2
28.10.1987	Optische Messverfahren für die Fertigung Schwerpunkte: Laseranwendungen, dimensionelles Messen, Formvergleich	3
22.02.1989	Hochgenaue Oberflächenmesstechnik mit Bildverarbeitung Schwerpunkte: Laseranwendungen, dimensionelles 3D-Messen, Formvergleich, Bildverarbeitung	4
10.10.1990	Fortschritte in der Messtechnik Schwerpunkte: Oberflächenmesstechnik, Robot Vision, Inspektion	5
18.02.1992	Oberflächenmesstechnik und Strahlformung mit Bildverarbeitung Schwerpunkte: 3D-Messen, Formvergleich, Bildverarbeitung, Strahlformung bei Hochleistungslasern	6
24.02.1993	Fortschritte in der Messtechnik und Miniaturisierung der Sensoren Schwerpunkte: Mikrooptik, Oberflächenmesstechnik, Inspektion	7
24.02.1994	Optische Messverfahren und Systeme; Stand der Technik und Zukunftsperspektiven Schwerpunkte: Mikrooptik; Oberflächenmesstechnik; Schwingungsmessung; absolute, genaue Abstandsmessung; medizinische Messtechnik	8
21.02.1995	Stand und Perspektiven der optischen Oberflächen- und Fertigungsmesstechnik Schwerpunkte: Mikrostrukturen, Interferometrie, Fertigungsmesstechnik, 3D-Messtechnik	9
21.02.1996	Stand und Perspektiven der optischen Miniaturisierung, Mikrooptik und Messtechnik Schwerpunkte: Nahfeldmikroskopie, Mikrostrukturen, Interferometrie, Fertigungsmesstechnik	10
19.02.1997	Stand und Perspektiven der optischen Messtechnik in der Biologie, Mikroskopie, Fertigung und Kommunikation	11
25.02.1998	Optik in der Messtechnik, Informationsspeicherung und -verarbeitung	12
17.02.1999	Stand und Perspektiven der Optik - Optik für Mikro- und Nanotechnologie	13

Datum	Titel	Nr.
23.02.2000	Optische Kommunikation, Mikroskopie und Messtechnik	14
28.02.2001	Perspektiven der Optik und Optikfertigung, hochauflösende Bild- und Informationsübertragung	15
20.02.2002	Perspektiven der dynamischen und adaptiven Optik und Messtechnik	16
19.02.2003	Fest-Kolloquium Optik Optik und Optoelektronik: Stand und zukünftige Entwicklung mit Abschiedsvorlesung von Prof. Dr. Hans Tiziani und Einführungsvorlesung von Prof. Dr. Wolfgang Osten	17
18.02.2004	Optische Fertigungsmesstechnik- Herausforderungen und Perspektiven	18
02.02.2005	Innovative optische Systemkomponenten I	19
22.02.2006	Innovative optische Systemkomponenten II	20
07.07.2006	ITO-Festkolloquium aus Anlass des 70. Geburtstages von Herrn Prof. Dr. H. Tiziani und der Eröffnung der neuen Mess- und Reinräume Thema: Optische Technologien - Innovation und Produktion am Standort Deutschland	21
28.02.2007	Innovation in der Medizintechnik durch Optische Technologien	22
27.02.2008	Optik: Grenzen überschreiten (beyond the limits)	23
25.02.2009	Photonik im Maschinenbau	24
10.09.2010	Jubiläumsfeier 50 Jahre ITO – 25. Optik-Kolloquium	25

