

**DER OZEAN**

**IM LABOR**

DER OZEAN IM LABOR

# MESSEN MIT LICHT UND SCHATTEN

BERND JÄHNE

**Aus den quantitativen Wissenschaften ist die Bildverarbeitung nicht mehr wegzudenken. Sie ist „das“ Mittel geworden, um komplexe zeitlich und räumlich variierende Prozesse zu erfassen und zu analysieren. Was die moderne Bildverarbeitung heute zu leisten vermag und welche Möglichkeiten neue Methoden schon in naher Zukunft erbringen werden, zeigt exemplarisch ein am Heidelberger Institut für Umweltphysik entwickeltes Verfahren zur Vermessung mikroskopisch dünner Grenzschichten an wellenbewegten Wasseroberflächen: Indem die Forscher Methoden zur Sichtbarmachung und spezifischen Beleuchtungstechniken mit der Bildverarbeitung kombinieren, können sie den Austausch von Spurengasen wie Kohlendioxid zwischen Luft und Wasser sichtbar machen.**

# S

Seit es die Wissenschaft gibt, nutzt sie Bilder, um Beobachtungen und Ergebnisse festzuhalten. Anfangs geschah dies in Form von Skizzen und Zeichnungen, Mitte des 19. Jahrhunderts jedoch revolutionierte die Erfindung der Fotografie den Umgang mit visuellen Zeugnissen. Erstmals konnten bildhafte Informationen objektiv festgehalten werden. Die quantitative Auswertung indes erfolgte zumeist mühsam manuell, was die Analyse beschränkte. Derzeit erleben wir eine zweite Revolution: Moderne Kameras erfassen Bilder digital, und die quantitative Auswertung übernehmen leistungsstarke Computer. Das Verarbeiten von Bildinformationen ist heute aus keiner quantitativen Wissenschaft mehr wegzudenken, und die Bildverarbeitung ist das Mittel geworden, um komplexe zeitlich und räumlich variierende Prozesse zu erfassen und quantitativ zu analysieren.

Bilder werden mit den unterschiedlichsten Verfahren und in allen Größenordnungen gewonnen - vom Satelliten in der Erdumlaufbahn bis hin zum Mikroskop auf dem Laborisch. Unabhängig von der Technik der Aufnahme stehen alle Anwender vor der gleichen Herausforderung: Zunächst müssen sie Methoden finden, um die relevanten Parameter in den Bildern sichtbar zu machen, und anschließend Algorithmen entwickeln, um ihre Ergebnisse mit dem Computer quantitativ auswerten zu können. Welche Möglichkeiten bildaufnehmende Messtechniken unter diesen Voraussetzungen eröffnen, soll am Beispiel der Untersuchung von Austauschprozessen dargestellt werden, die zwischen der Atmosphäre und den Weltmeeren stattfinden - einem Teilgebiet der Umweltphysik.

## Unsichtbares sichtbar machen

Am Anfang unserer Forschungsarbeiten stand die Frage, wie umweltrelevante Spurengase zwischen der Atmosphäre und den Weltmeeren ausgetauscht werden. Zu den umweltrelevanten Spurengasen zählt Kohlendioxid, das in die Atmosphäre gelangt, wenn fossile Energieträger verbrennen. Das Grundproblem bei dieser Fragestellung ist: In der Atmosphäre und im Ozean wird das Kohlendioxid durch turbulente Strömungen schnell vermischt. Je näher es an die Meeresoberfläche kommt, desto weniger effektiv ist die Durchmischung. Schließlich ist sie so gering, dass die

**„Wir haben Methoden entwickelt, mit denen sich Austauschprozesse in der Mikrometerdünnen Grenzschicht an der wellenbewegten Wasseroberfläche messen lassen.“**

Moleküle nur noch durch ihre thermische Eigenbewegung transportiert werden. Dieser Prozess – er nennt sich molekulare Diffusion – erfolgt im Wasser um etwa vier Größenordnungen langsamer als in der Luft. Der „Flaschenhals“ für den Transport von Kohlendioxid – und aller anderen im Wasser nur wenig löslichen Spurengase – von der Atmosphäre in das Meer ist demnach die nur 20 bis 200 Mikrometer dünne Grenzschicht des Wassers an der Meeresoberfläche. Dort gilt es, die Konzentrationsfelder der gelösten Gase und die turbulente Wasserbewegung zu messen.

Wie aber lassen sich in einer derart dünnen Schicht, die sich zudem aufgrund der vom Wind erzeugten Wellen ständig auf und ab bewegt, Messungen durchführen? Mit bloßem Auge ist nichts von all diesen Prozessen zu sehen. Allenfalls ist grob die Neigung der Wellen an einer Modulation der Helligkeit zu erkennen, weil der Reflexionskoeffizient vom Winkel zwischen der Wasseroberfläche und der Blickrichtung abhängt. Alles andere bleibt verborgen und liegt trotz Licht im Dunkel.

In einem ersten Schritt müssen also Techniken zur Sichtbarmachung entwickelt werden. Dabei gilt es, alle relevanten Messgrößen einzubeziehen und sie mit geeigneten Verfahren in Helligkeit beziehungsweise Lichtfelder umzusetzen, die sich messen lassen. Unserer Arbeitsgruppe ist genau dies in den letzten Jahren gelungen: Wir haben Methoden entwickelt, mit denen nicht nur die vom Wind erzeugten Wellen und die durch brechende Wellen in das Wasser eingetragenen Blasen gemessen werden können, sondern auch die Strömung und die Konzentrationsfelder von in Wasser gelösten Gasen nahe der Wasseroberfläche.

### **Das Heidelberger Aeolotron**

Solche Messtechniken lassen sich nur sehr schwer auf dem Ozean einsetzen – deshalb gilt es, den Ozean ins Labor zu bringen. Die zu betrachtende Grenzschicht selbst ist zwar äußerst dünn, dennoch muss die Versuchseinrichtung groß genug sein, um einigermaßen realistische Wellen erzeugen zu können. Dafür steht im Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg schon seit dem Jahr 1999 ein weltweit einmaliger Aufbau bereit – das nach Aeolus, dem griechischen Gott der Winde, benannte „Aeolotron“. Angetrieben von zwei großen Ventilatoren bläst der Wind in dieser „Windschleuder“ in einer Rinne im Kreis. Aufgrund der kreisförmigen Geometrie bauen sich die Wellen so lange auf, bis die durch den Wind eingetragene Energie mit der von den Wellen in Turbulenz umgewandelte Energie im Gleichgewicht steht. Dieses Gleichgewicht kann sich in herkömmlich verwendeten linearen Windkanälen nicht einstellen, da der Wind dort nur eine kurze Strecke weht und schnell am Ende des Kanals angekommen ist. Die künftige Herausforderung wird es sein, zumindest einen Teil der nachfolgend beschriebenen Techniken nicht nur im Labor, sondern auch auf dem Meer einzusetzen.

### **Vermessung kleinskaliger Prozesse**

Wellen lassen sich messen, indem man die Reflexion oder Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche bestimmt. In der Fachsprache werden diese Verfahren „Shape from Shading“ genannt: Gestalt durch Schattierung. Mit Hochgeschwindigkeitskameras und einer besonders hellen LED-Lichtquelle ist es uns kürzlich gelungen, Wellen mit über 1.500 Bildern pro Sekunde

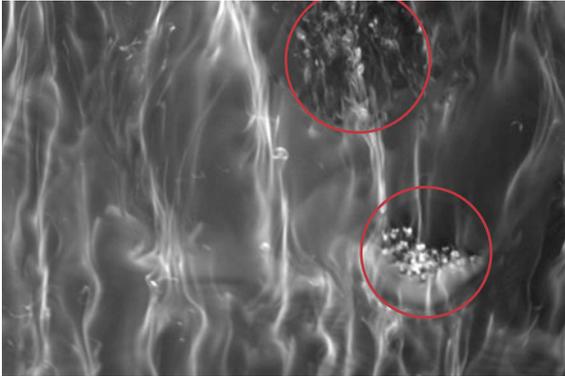
### **Dritte Säule der Wissenschaft:**

#### **Das Wissenschaftliche Rechnen**

Das Interdisziplinäre Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) wurde im Jahr 1987 als das bundesweit erste universitäre Forschungszentrum seiner Art gegründet. Die Forscher am IWR befassen sich mit Fragestellungen aus Natur-, Technik- und Geisteswissenschaften und bearbeiten sie mit dem Methodenrepertoire des Wissenschaftlichen Rechnens: der mathematischen Modellierung, Simulation und Optimierung, der Bild- und Datenverarbeitung sowie der Visualisierung. Als Querschnittsdisziplin trägt das Wissenschaftliche Rechnen entscheidend zur Lösung anspruchsvoller Probleme aus Wissenschaft und Technik bei und gilt damit als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Seine Methoden kommen bei so unterschiedlichen Fragestellungen zum Einsatz wie dem Entwurf effizienter Brennstoffzellen, der Simulation der Vorgänge beim Hirninfarkt, der Prognose des Pestizidabbaus im Boden oder auch der Optimierung von Bewegungsabläufen.

Das IWR umfasst heute mehr als fünfzig Forscherteams aus den unterschiedlichsten Fakultäten sowie neun von jungen Wissenschaftlern geführte Nachwuchsgruppen. Rund fünfhundert Forscherinnen und Forscher arbeiten im Rahmen des Zentrums in interdisziplinären Kooperationen zusammen. Neben Mathematik, Physik, Chemie und Informatik sowie den Lebenswissenschaften sind hier zunehmend auch die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, die Psychologie, die Kognitionswissenschaften sowie die Geistes- und Kulturwissenschaften vertreten. Die Infrastruktur des IWR, auf die die Forscher zurückgreifen können, umfasst unter anderem Hochleistungsrechner, 3D-Graphiklabore sowie spezielle Laser-Scanner. Auf Initiative des IWR entstand 2007 die „Heidelberger Graduiertenschule der mathematischen und computergestützten Methoden in den Wissenschaften“ (HGS MathComp), die in der Exzellenzinitiative gefördert wird. Hier forschen derzeit gut 150 Doktoranden aus allen am Zentrum vertretenen Fächern.

[www.iwr.uni-heidelberg.de](http://www.iwr.uni-heidelberg.de)



Erstmals ist es Heidelberger Wissenschaftlern des Instituts für Umweltphysik gelungen, direkt sichtbar zu machen, wie Spurengase von der Atmosphäre ins Wasser transportiert werden. Die räumlichen Muster zeigen die Struktur der oberflächennahen Turbulenz. Dabei sind zwei Ereignisse zu sehen (rot eingekreist), bei denen die geordnete Wellenbewegung in Turbulenz zerfällt – ein Vorgang, der auch als mikroskaliges Wellenbrechen bezeichnet wird.

aufzunehmen. Das erlaubt es, selbst die Frequenzen und Wellenlängen kleinster Kapillarwellen zu messen.

Brechende Wellen schlagen Blasen in das Wasser. Auch das muss bei der Messung berücksichtigt werden, denn die Blasen bilden eine zusätzliche Austauschfläche, sodass ein stark erhöhter Gasaustausch möglich ist. In unsere Berechnungen beziehen wir also auch die Anzahl der Blasen pro Radius oder Volumen ein sowie die Dauer, mit der die Blasen im Wasser bleiben. Zudem gilt es, die Strömung unmittelbar über und unter der Wasseroberfläche zu erfassen. Dies ist besonders schwierig, weil hier eine volumenhafte Messung unerlässlich ist. Dazu müssen wir die Komponenten der Geschwindigkeit des Strömungsfeldes abhängig von der Distanz zur Wasseroberfläche messen. Schließlich ist es die Aufgabe, die Konzentrationsfelder der gelösten Gase in der Grenzschicht zu bestimmen. Technisch ist das am aufwendigsten – und es hat einige Zeit gedauert, bis wir auch für dieses Problem eine Lösung fanden.

Die Grundidee ist einfach: Ein alkalisches Gas, beispielsweise Ammoniak, wird in geringer Konzentration in das Aeolotron gegeben und das Wasser im Kanal angesäuert. Nun wird ein Indikator hinzugegeben, der nur im alkalischen Bereich fluoresziert. Aufgrund der Absorption des alkalischen Gases Ammoniak wird ein von der Luftkonzentration abhängiger Teil der Grenzschicht alkalisch. Infolgedessen leuchtet ein einstellbarer Bruchteil der dünnen Grenzschicht mit einer Helligkeit auf, die proportional zur Grenzschichtdicke ist. Nach vielen Versuchen ist es unserer Doktorandin Christine Kräuter im Jahr 2014 gelungen,

**„Die erste Revolution im Umgang mit Bildern war die Fotografie. Die zweite Revolution erleben wir heute mit modernen digitalen Kameras und leistungsstarken Computern. Eine dritte Umwälzung steht mit der neuartigen lichtfeldbasierten Bildverarbeitung bevor.“**



**PROF. DR. BERND JÄHNE** studierte Physik in Saarbrücken und Heidelberg. 1985 wurde er an der Universität Heidelberg in Physik und sieben Jahre später an der TU Hamburg-Harburg in Angewandter Informatik habilitiert. Von 1988 bis 1994 hatte er eine Forschungsprofessur am „Scripps Institution of Oceanography“ in La Jolla (San Diego, Kalifornien) inne. Im Anschluss nahm Bernd Jähne eine Professur am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) und am Institut für Umweltphysik an, wo er das Wind/Wellen-Kanal-Labor leitet. Seit dem Jahr 2008 ist er zudem Mitgründer und koordinierender Direktor des Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI) am IWR, einem sogenannten „Industry on Campus“-Projekt der Universität Heidelberg. Darüber hinaus ist er einer der stellvertretenden geschäftsführenden Direktoren des IWR.

Kontakt: bernd.jaehne@iwr.uni-heidelberg.de

dieses Verfahren mit einer hohen Bildqualität von bis zu 100 Bildern pro Sekunde am Aeolotron zu realisieren. Viele technische Schwierigkeiten waren dabei zu überwinden. Das schwache Fluoreszenzlicht etwa konnte nur in Kombination mit einem neuen Fluoreszenzindikator, einer sehr hellen gepulsten LED-Lichtquelle und mit hochempfindlichen Kameras gemessen werden (siehe Abbildung auf Seite 55).

### Industrielle Anwendungen

Bei allen neuen Verfahren zur Aufnahme, Verarbeitung und Auswertung von Bildern stellt sich immer auch die Frage, ob es möglich ist, sie auf andere Anwendungsgebiete zu übertragen. So haben unsere ursprünglich für die Umweltphysik entwickelten Verfahren bereits vielfältige Anwendungen in der Industrie gefunden. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung einer unserer Messmethoden in der Biotechnologie mit dem Ziel, Zellen direkt im Bioreaktor mit einem dort angebrachten Mikroskop zu zählen. Das Problem dabei ist, dass sich kein Messvolumen definieren lässt und im Bildausschnitt scharf wie unscharf abgebildete Zellen nebeneinander erscheinen. Genau vor diesem Problem standen auch wir, als es darum ging, die Größe und Anzahl der Gasblasen zu messen, die von den brechenden Wellen ins Wasser geschlagen werden. Schließlich entwickelten wir ein Verfahren, das die Unschärfe quantitativ erfassen, den Abstand der Teilchen von der Schärfebene bestimmen und aus den unscharf abgebildeten Blasen auf deren tatsächlichen Durchmesser und ihre Größe schließen lässt. Diese Methode ließ sich unmittelbar auf den Bioreaktor und die Zellen übertragen.

Im „Heidelberg Collaboratory for Imaging Processing“, das im Jahr 2008 gegründet wurde, arbeiten wir gemeinsam mit acht Industriepartnern an grundlegenden Problemen der Bildanalyse. Anwendungen reichen von der industriellen Qualitätskontrolle über Fahrerassistenzsysteme bis hin zum Einsatz in Medizin und Biologie. Einer unserer aktuellen Forschungsschwerpunkte gilt dabei der optischen 3D-Messtechnik, denn ein einzelnes Bild verrät nur wenig über eine dreidimensionale Szene: Die Entfernung der Objekte geht verloren, wir wissen nicht, wie groß die Objekte sind, und wir können nur wenig über die optischen Materialeigenschaften der abgebildeten Objekte aussagen.

Sowohl in der optischen 3D-Messtechnik als auch in der „Computervision“ – dem maschinellen Sehen – wurden in den vergangenen Jahrzehnten enorme Fortschritte bei den Versuchen erzielt, die dreidimensionale Struktur einer Szene genau zu erfassen und präzise zu vermessen. Dabei standen zunächst geometrische Ansätze im Vordergrund. Bei „nicht kooperativen“ Oberflächen allerdings, also bei Oberflächen mit komplexen optischen Eigenschaften, die

### Physikalische Untersuchung des Systems Erde

Das Institut für Umweltphysik (IUP) entstand im Jahr 1975 an der Universität Heidelberg – ein Ereignis, mit dem gleichzeitig der Begriff „Umweltphysik“ geprägt wurde. Ihre Anfänge als eigener Forschungszweig hatte die Umweltphysik in den 1950er-Jahren aus der Anwendung kernphysikalischer Messmethoden zur Untersuchung des Systems Erde nach physikalischen Gesichtspunkten genommen. Damals wie heute beschäftigt sie sich mit Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Fluss von Energie und Materie in unserer Umwelt. Das Wort Physik weist dabei auf den Blickwinkel hin, unter dem Umweltprozesse betrachtet werden.

Die Forschungsaktivitäten am Institut erstrecken sich auf ein weites Themenfeld – sowohl hinsichtlich der untersuchten Umweltbereiche als auch der verwendeten Untersuchungsmethoden. Erforscht werden die Physik von Transport- und Mischungsvorgängen sowie die Stoffumwandlung und der Energieaustausch innerhalb und zwischen einzelnen Umweltsystemen wie der Atmosphäre, dem Boden und dem Wasserkreislauf. Zu den verwendeten Methoden gehören unter anderem die Massenspektrometrie, die Gaschromatographie, die Spektroskopie und die Fernerkundung von Satelliten mittels Bodenradar sowie die Bildverarbeitung und die numerische Simulation in Zusammenarbeit mit dem IWR. Zum Studium kleinskaliger Austauschprozesse zwischen Ozean und Atmosphäre verfügt das IUP zudem über ein Wind/Wellen-Kanal-Labor – das Heidelberger Aeolotron, das von Professor Dr. Bernd Jähne geleitet wird.

[www.iup.uni-heidelberg.de](http://www.iup.uni-heidelberg.de)

nicht einfach ideal glatt oder ideal matt sind, versagen diese Ansätze. Derartige Oberflächen lassen sich nur mit einer sogenannten bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktion oder noch komplizierteren Funktionen beschreiben.

Unsere neue Technik im Bereich des „Computational Imaging“ – die lichtfeldbasierte Bildverarbeitung – macht es nun möglich, solche dreidimensionalen Szenen komplett zu beschreiben. Dieser innovative Ansatz, bei dem Lichtfelder anstatt Bilder aufgenommen werden, führt nicht nur zu einer umfassenden Theorie aller möglichen optischen 3D-Aufnahmesysteme – mit ihm gelingt es auch, die optischen Eigenschaften von Oberflächen direkt zu schätzen. Darüber hinaus wird es möglich, die Entfernung von Objekten zur Kamera zu bestimmen (3D-Kamera) und bisherige Grenzen der Tiefenschärfe konventioneller Objektive zu überwinden.

THE OCEAN IN THE LAB

# MEASUREMENTS WITH LIGHT AND SHADOW

BERND JÄHNE

From ancient times, science has always used images to document observations and results. In the beginning, people made sketches and drawings, but in the mid-19th century, the advent of photography revolutionised the way we use visual documentation. For the first time, images could be recorded objectively. The quantitative analysis of the photographs, however, was a time-consuming manual task, which restricted analysis. Today we are experiencing a second revolution: Modern cameras record digital images that are subsequently analysed by powerful computers. Image processing has become an indispensable part of any modern quantitative science – it is the means of choice when it comes to the capture and quantitative analysis of complex processes that vary in time and space.

Such complex processes are encountered in environmental science. One research topic at the Heidelberg Institute of Environmental Physics is the question of how environmentally relevant trace gases are exchanged between the atmosphere and the world's oceans. The 'bottleneck' for the transport of trace gases from the atmosphere into the sea is a boundary layer of surface water that is only 20 to 200 micrometres thick. The processes taking place in this agitated boundary layer are investigated by environmental researchers in cooperation with the Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI) at the Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR). Together the scientists developed a number of new methods to visualise these complex transactions and to process the resulting image sequences. The new methods allow them to measure not only water waves generated by the wind and the bubbles introduced to the water by breaking waves, but also the current near the water surface and concentration fields of dissolved gases in the thin boundary layer. In this way, the mechanism of air-water gas transfer can finally be understood. ●

PROF. DR BERND JÄHNE read physics in Saarbrücken and Heidelberg. In 1985 he completed his habilitation in physics at Heidelberg University, and seven years later obtained the same qualification in applied computer science from TU Hamburg-Harburg. From 1988 to 1994 he held a research chair at the Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (San Diego, California). Following his return to Germany, Bernd Jähne accepted a chair at the Interdisciplinary Center for Scientific Computing (IWR) and the Institute of Environmental Physics, where he heads the wind/wave research facility. In 2008 he became co-founder and coordinating director of the Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI) at IWR, an Industry on Campus project of Heidelberg University. He is also a deputy managing director of the IWR.

Contact: bernd.jaehne@iwr.uni-heidelberg.de

**“The first imaging revolution was the invention of photography. The second revolution is taking place right now: it involves modern digital cameras and powerful computers. And a third transformation is fast approaching with novel imaging methods based on light fields.”**

Das neue Verfahren sprengt die Grenzen bisheriger optischer Messtechniken. Mit ihm lassen sich weit mehr Informationen gewinnen als mit konventionellen Bildaufnahmen. Die lichtfeldbasierte Bildverarbeitung wird damit nach der digitalen Fotografie zu einer dritten Revolution im Bereich der Bildgewinnung führen: Schon in naher Zukunft ist mit neuartigen Systemen zur Bildaufnahme und Visualisierung in Wissenschaft und Technik zu rechnen sowie mit neuen Generationen digitaler Kamerasysteme für jedermann. Auch für unsere Forschungen zu Austauschprozessen an der Meeresoberfläche bedeutet das neue Verfahren einen Meilenstein: Mit ihm können wir Strömungen und Konzentrationsfelder, in denen die Austauschprozesse stattfinden, künftig nicht nur flächig, sondern dreidimensional sichtbar machen. Dies ermöglicht es uns, Mechanismen des Austauschs von Spurengasen an der Meeresoberfläche quantitativ zu entschlüsseln, die bisher im Dunkeln liegen. ●

#### **HCI: Denkfabrik für die Bildverarbeitung**

Das Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI) gilt als „Denkfabrik“ für die Bildverarbeitung und ist eines der größten Zentren seiner Art in Deutschland. Im Jahr 2008 wurde es innerhalb der Universität Heidelberg als „Industry on Campus“-Projekt eingerichtet; beteiligt sind neben der Robert Bosch GmbH, Bosch Indien, die Sony Corporation, die Carl Zeiss AG, die Bayer AG, Heidelberg Engineering, Silicon Software und die PCO AG. Ziel der interdisziplinär ausgerichteten Forschungseinrichtung ist es, lang anstehende, schwierige Probleme der Bildverarbeitung zu lösen und sie anschließend mit den beteiligten Firmen sowie weiteren Kooperationspartnern in Applikationen zu überführen.

Das HCI besteht aus den vier Lehrstühlen für Bildverarbeitung der Universität sowie einer assoziierten Forschungsgruppe. Rund achtzig Mitarbeiter arbeiten an der Forschungseinrichtung – darunter zahlreiche Postdoktoranden, die über die Exzellenzinitiative und die beteiligten Industriepartner gemeinsam finanziert werden. Prof. Dr. Bernd Jähne ist Mitgründer sowie koordinierender Direktor des HCI und leitet hier die Arbeitsgruppe „Digitale Bildverarbeitung“.

[www.hci.iwr.uni-heidelberg.de](http://www.hci.iwr.uni-heidelberg.de)

**„Mit Verfahren,  
die Lichtfelder statt  
Bilder aufnehmen,  
werden die  
Grenzen bisheriger  
optischer Mess-  
techniken gesprengt.“**