

Mikroskopaufnahme einer Schädigung
auf einem optischen Fenster

Hohe Ansprüche an Laseroptiken für die Weltraumforschung

Nimmermüde und unverwundbar

Von Wolfgang Riede, Paul Allenspacher und Dr. Helmut Schröder

Optische Messverfahren machen Karriere. Immer neue Anwendungen werden erschlossen. Lasersysteme vermögen im All bisher Unmögliches zu leisten. Mit ihrer Hilfe können beispielsweise planetare Oberflächen und Atmosphären vermessen werden. Doch die Anforderungen an die Präzision und Zuverlässigkeit der optischen Systeme sind extrem hoch. Ihre aufwändige Qualifizierung ist für den Erfolg insbesondere von Langzeitmissionen unabdingbar. Ein Forscherteam am DLR-Institut für Technische Physik in Stuttgart befasst sich damit.

Die Lasertechnik gewinnt sowohl bei der Erdbeobachtung als auch bei der planetaren Erkundung an Bedeutung. Eine Vorreiterrolle spielt hier die US-Weltraumbehörde NASA. Sie hat in der Vergangenheit schon einige Lasersysteme für Weltraumanwendungen entwickelt. Auch die Europäische Weltraumagentur ESA plant eine Reihe von explorativen Missionen, bei denen modernste Lasermesstechnik zum Einsatz kommen soll. Ziele dieser Missionen sind die Bestimmung von planetaren Oberflächenentopologien, die Bestimmung der Konzentration atmosphärischer Gase und deren Zirkulationseigenschaften.

Schon in zwei Jahren soll die erste europäische Lidar (Light Detection and Ranging)-Mission gestartet werden. Diese Mission ist nach Aeolus, dem griechischen Gott des Windes, benannt. Ihr Ziel ist es, die Atmosphäre global über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu vermessen um ein Bild von ihrer Dynamik zu erstellen.

Die einzige Nutzlast des Aeolus-Satelliten ist ein „Atmospheric Laser

Doppler Instrument“ (ALADIN), ein im ultravioletten Spektralbereich operierendes aktives Lidar-System, welches die ersten 30 Kilometer unserer Atmosphäre aus einer Bahnhöhe von 400 Kilometern sondieren wird. Für die Entwicklung von ALADIN ist EADS-Astrium verantwortlich, mit der Entwicklung des Lasersystems selbst wurde Galileo Avionica beauftragt.

Windvermessung aus dem All

Zum ersten Mal wird es mit der Aeolus-Mission möglich werden, die troposphärischen beziehungsweise stratosphärischen Windgeschwindigkeitsverteilungen mit hoher vertikaler Auflösung von nur wenigen Kilometern zu bestimmen. Derzeit sind die Windgeschwindigkeitsverteilungen über großen Teilen der Tropen und auch über den Ozeanen nur unvollständig bekannt. Aus den Messdaten werden tiefere Einsichten in die atmosphärische Zirkulation großskaliger Wetterphänomene wie etwa dem El-Niño-Phänomen und Erkenntnisse zum Verständnis der Austausch-

prozesse zwischen Troposphäre und Stratosphäre erwartet. Ist das Wissen dazu ungenau, so stimmen auch die Klimamodelle nicht. Darüber hinaus verspricht man sich auch deutliche Verbesserungen für die kurzfristige numerische Wettervorhersage. Die Vermessung der Windprofile erfolgt entsprechend den von der WMO (World Meteorological Organization) vorgegebenen Anforderungen. Alle Daten werden in Echtzeit über die Empfangsstation in Svalbard auf Spitzbergen für die Wettervorhersage verfügbar gemacht.



Der europäische Satellit Aeolus soll in zwei Jahren Windgeschwindigkeitsprofile mittels Laserstrahl ermitteln

Die Entwicklung eines satellitengestützten Wind-Lidar-Systems fordert Wissenschaftler und Techniker heraus. Auf Grund des großen Abstandes vom Orbit zur Atmosphäre werden sehr leistungsstarke Laser in Kombination mit großen Leichtbauteleskopen und empfindlichen Empfängern benötigt.

Das ALADIN-Lasersystem sendet über ein Spiegelteleskop von 1,5 Meter Durchmesser kurze Lichtimpulse im nahen UV-Spektralbereich bei 355 Nanometer Wellenlänge aus. Die Laserpulse werden zunächst mit einem Nd:YAG-Laser bei 1.064 Nanometern erzeugt und in einem zweistufigen Prozess in ihrer Frequenz verdreifacht. Die von der Atmosphäre zurückgestreute UV-Strahlung wird von diesem Teleskop auch wieder empfangen. Obwohl intensive Laserpulse mit bis zu 120 Millijoule Pulsenergie ausgesandt werden, kommen nur wenige Pho-

tonen zurück. Aus den Laufzeiten der in der Atmosphäre reflektierten Strahlung und ihrer Dopplerverschiebung erhält man sowohl Hinweise auf die Strömungs- bzw. Windverhältnisse in der Atmosphäre in unterschiedlichen Höhen, als auch über die vertikalen Wolkenverteilungen.

Das System soll über einen Zeitraum von drei Jahren kontinuierlich in Betrieb sein und dabei rund fünf Milliarden Pulse abgeben. A und O ist dabei ein servicefreier Betrieb über diesen langen Zeitraum. Dieser wird nun durch zuverlässige hochleistungsfähige Laserdioden mit der entsprechenden Lebensdauer möglich. Die Gesamtkosten liegen bei rund 300 Millionen Euro, davon entfallen circa 200 Millionen auf den Satelliten.

Parallel zur Entwicklung des satellitengestützten Lidar-Systems wurde von EADS-Astrium in Toulouse ein technisch vergleichbares Lasersystem namens „ALADIN Airborne Demonstrator“ (A2D) konzipiert. Dieser Prototyp wurde am Institut für Physik der Atmosphäre in Oberpfaffenhofen in das DLR-Forschungsflugzeug Falcon integriert. Erste Testflüge mit aktiviertem Doppler-Lidar-System sind erfolgreich absolviert worden. Für das Frühjahr 2007 sind Flugkampagnen geplant, deren Ergebnisse mit konventionellen bodengestützten Windmesstechniken verglichen werden sollen. Ein wichtiges Ziel des A2D ist auch der Test des Datentransfers bzw. der Datenauswertung für das ALADIN-System.

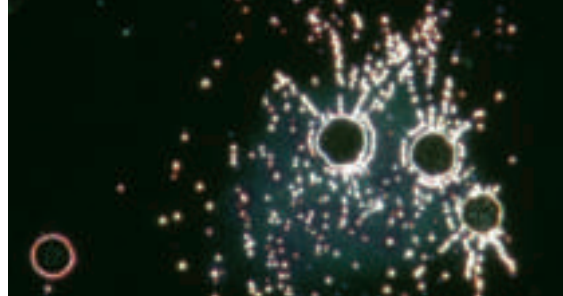
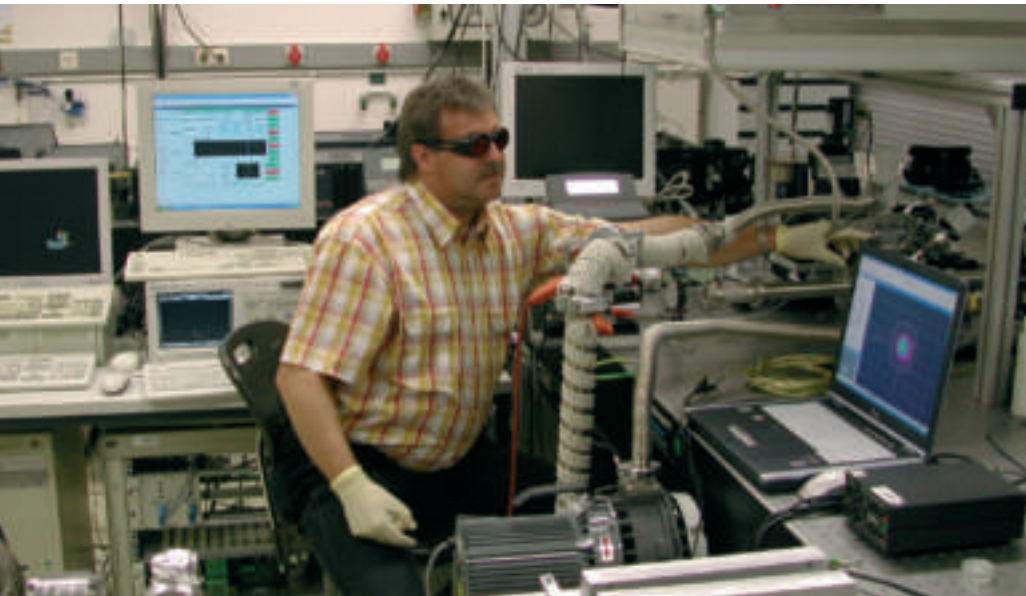
Risiken und Nebenwirkungen des Vakuums

Der Langzeitbetrieb von Lasersystemen unter Vakuumbedingungen muss Ansprüchen genügen, denen nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit Rechnung getragen werden kann. So müssen die verwendeten Optiken – und insbesondere deren Beschichtungen – für die jeweils applizierte Laserenergiedichte ausgelegt sein, und zwar unter Berücksichtigung gewisser Sicherheitsmargen. Im Vakuum zeigen bestimmte Optiken eine Degradation in ihrer Belastbarkeit, den so genannten Air-Vacuum-Effekt. Darüber hinaus führt Langzeitexposition zur Ermüdung der optischen Komponenten (Optical-Fatigue-Effekt). Beides ist insbesondere für die Aeolus-Mission von großer Bedeutung, da während der langen Missionsdauer kein Austausch der Optiken im Orbit vorgesehen ist.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die Kontamination von Optiken. Unter den im Satelliten herrschenden Vakuumbedingungen kommt es zu einem Ausgasen der flüchtigen Bestandteile von Klebeverbindungen und Kunststoffen. Bei Laserexposition können diese in geringsten Partialdrücken vorhandenen Substanzen zersetzt werden und sich in chemisch geänderter Form auf der Optik anreichern. Die so entstandenen Schichten können die Oberflächenabsorption massiv erhöhen und im Laufe der Zeit zu einem teilweisen oder vollständigen Funktionsausfall führen.



Modulare Ultrahochvakuumkammer für Langzeittests von Laseroptiken



Oben: Dunkelfeld-Mikroskopien optischer Schädigung im Vakuum
Links: Vorbereitung eines Vakuumtests
Unten: Hellfeldmikroskopie einer Optikscheidung

Tests zur Weltraumtauglichkeit

Am DLR-Institut für Technische Physik in Stuttgart werden im Labor für Laserverwundbarkeit schon seit geraumer Zeit optische beziehungsweise optronische Komponenten auf ihre Belastbarkeit unter Laserstrahlung geprüft. Diese Schädigungsschwellen werden unter Berücksichtigung internationaler Standards der Zerstörungsschwellenmessung ermittelt. Die hierbei erlangte Expertise war eine ideale Voraussetzung für die Durchführung von Qualifikationstests von Weltraumoptiken. Um über möglichst realistische Bedingungen zu verfügen, mussten jedoch noch verschiedene Hoch- bzw. Ultrahochvakuumkammern entwickelt werden.

Diese Kammern erlauben nun die Zufuhr und Kontrolle von Kontaminationssubstanzen wie Silikonen, Polyurethanen und Epoxidharzen in geringster Dosierung. Sehr kleine Partialdrücke können mittels Restgasanalysatoren bestimmt werden. Die eigentlichen Testparameter wie

Repetitionsrate, Burstmodus und anderes mehr mussten weitestgehend an die ALADIN-Betriebsparameter angepasst werden. Die Optiken werden bei drei verschiedenen, im Lasersystem auftretenden Wellenlängen im Nahen Infrarot (1.064 Nanometer) als auch im sichtbaren (532 Nanometer) und ultravioletten Spektralbereich (355 Nanometer) getestet.

Inzwischen werden am Institut für Technische Physik sämtliche Laseroptiken für die Aeolus-Mission qualifiziert. Die Arbeiten werden gemeinsam mit der Europäischen Raumfahrtbehörde und mit europäischen Firmen wie ASTRIUM und Galileo Avionica durchgeführt.

Hochempfindliche Sensorik

Die Qualifizierung der Optiken erfordert aber noch mehr. Zum einen sind Ablagerungen auf optischen Oberflächen hochempfindlich nachzuweisen, zum anderen muss eine optische Schädigung während der



Laserbestrahlung in einer Vakuumkammer detektiert werden. Hierfür mussten von den DLR-Wissenschaftlern neue Nachweismethoden entwickelt und vorhandene verbessert werden.

Zum sensitiven Nachweis von geringsten Mengen an Ablagerungen wird das Verfahren der abbildenden Fluoreszenzmesstechnik eingesetzt. Es zeigte sich, dass mit dieser Methode Ablagerungen, welche aus ursprünglich aliphatischen bzw. aromatischen Kohlenwasserstoffen entstanden sind, mit Schichtdicken von nur wenigen Nanometern online und in-situ nachgewiesen werden können.

Über die spektrale Vermessung der Fluoreszenz können die Bestandteile der Ablagerungen analysiert werden.

Die transiente Drucksensorik ist ein neues, patentiertes Verfahren, mit welchem der Abtrag von geringsten Mengen von Material aus der Oberfläche der Optiken nachgewiesen werden kann. Diese Methode setzt das Vorhandensein eines Vakuums von 10^{-4} Millibar oder besser voraus und erlaubt den Nachweis der Schädigung durch kurzfristige Druckerhöhung in der Vakuumkammer. Das Standardverfahren zum Nachweis optischer Schädigung ist die Streulichtmethode. Dabei wird eine Zunahme des Streulichtes von der Probe als Indikator für Schädigung eingesetzt.

Inzwischen haben die Wissenschaftler am Institut für Technische Physik wichtige Erkenntnisse für den Langzeitbetrieb von Laseroptiken unter Vakuum gewonnen. Es zeigte sich, dass die Degradation von Optiken schon nach einer Verweilzeit im Vakuum von wenigen Stunden auftritt.

Dieser Effekt ist nur bei weniger kompakten Schichten vorzufinden. Es empfiehlt sich also, für Vakuumwendungen auf Beschichtungsverfahren zurückzugreifen, welche kompaktere Schichten produzieren. Bei den Kontaminationstests zeigte sich, dass möglichst keine Adhäsive verwendet werden sollten, welche aromatische Kohlenwasserstoffe enthalten. Diese führen insbesondere bei Bestrahlung im UV-Bereich zu karbonisierten Ablagerungen auf der Oberfläche der Optik und infolgedessen zu stark erhöhter Absorption. Solche Ablagerungen entstehen schon bei geringsten Partialdrücken (10^{-6} Millibar).

Noch offene Fragen

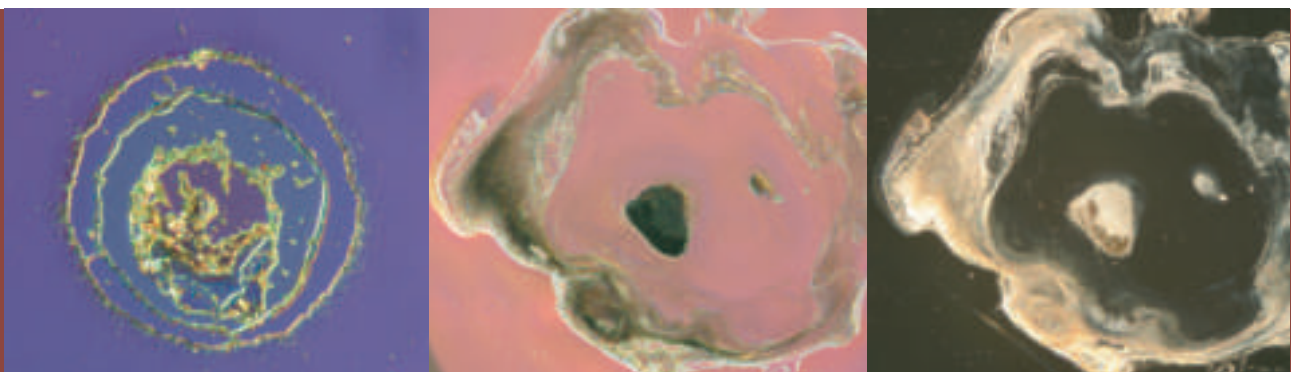
Derzeit wird an Methoden gearbeitet, mit denen diese Ablagerungen verhindert werden können. Es wurde auch festgestellt, dass durch die Zugabe von Wasser bzw. Sauerstoff mit geringem Partialdruck die Wachstumsgeschwindigkeit der Ablagerungen reduziert wird. Außerdem zeigen sich

fluorid-basierte obere Schichten resistent gegen Ablagerungen.

Doch noch immer sind die chemischen und physikalischen Prozesse, die zur Bildung von laserinduzierten Kontaminationen führen, nicht gänzlich verstanden. Offene Fragen betreffen insbesondere die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und den organischen Substanzen, die laserinduzierten Transportprozesse im Vakuum und die selektive Ablagerung in der laserbestrahlten Oberfläche. Es bleibt daher generelles Ziel, diese Prozesse genau zu erforschen, um für künftige Missionen absolut zuverlässig funktionierende Laseroptiken bereitzustellen.

Autoren:

Die Autoren sind wissenschaftliche Mitarbeiter am DLR-Institut für Technische Physik in Stuttgart. Dipl.-Phys. (ETH) Wolfgang Riede leitet die Fachgruppe Aktive Optische Systeme, Dipl.-Chem. Paul Allenspacher ist verantwortlich für die Qualifikationstests, Dr. Helmut Schröder untersucht Kontaminationseffekte auf Laseroptiken.



Hellfeld-Mikroskopie von Schädigungen auf einer vergüteten Glasoptik und rechts einer massiven Kohlenstoffablagerung auf einer Quarzglasoberfläche

