



Das Magazin des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) · www.DLR.de · Nr. 132 · November 2011

magazin 132

Und täglich grüßt der Pinguin

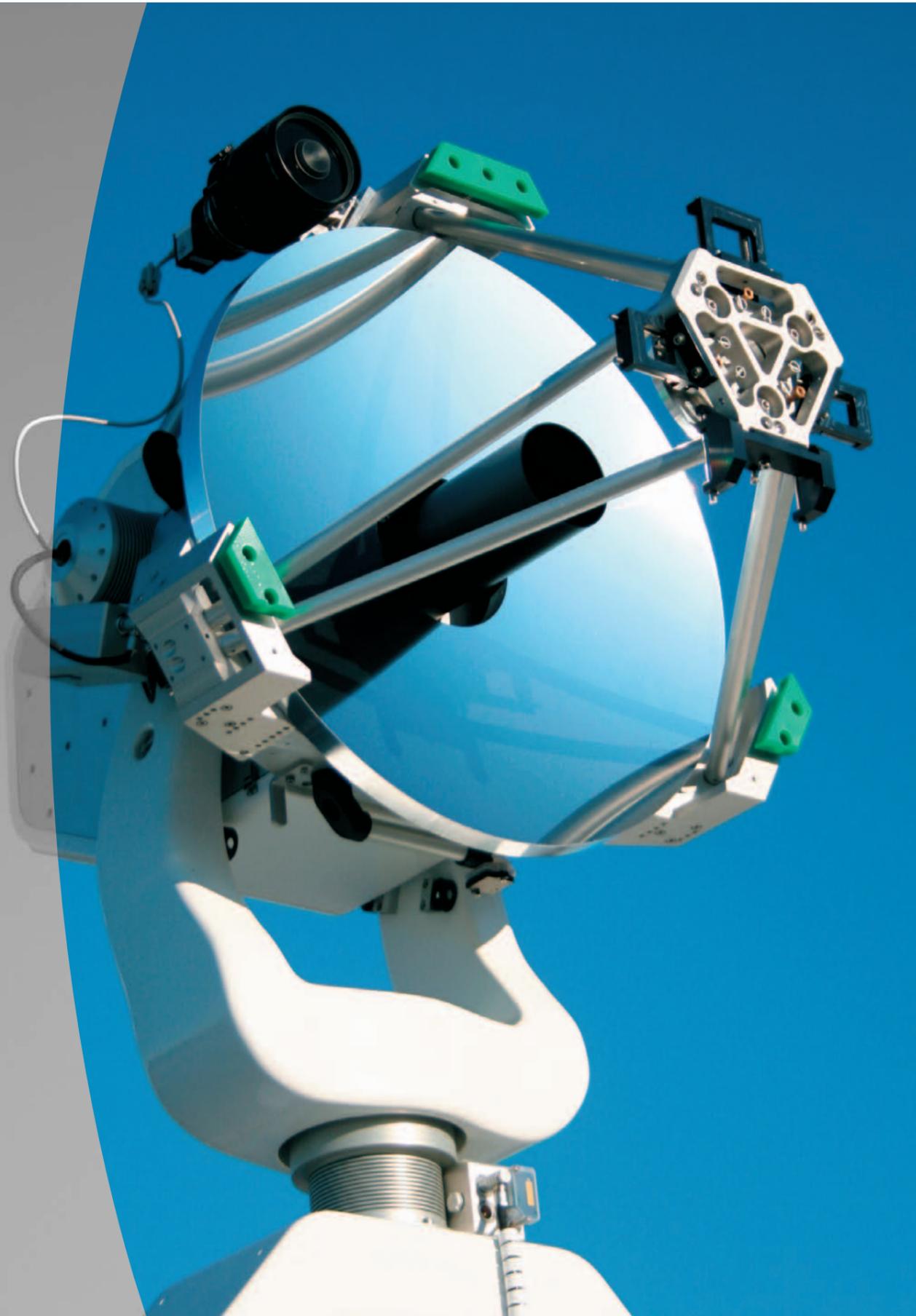
20 Jahre DLR-Antarktisstation GARS O'Higgins

Auf der Suche nach Antimaterie

Interview mit Stephan Schael über das
Alpha-Magnet-Spektrometer auf der ISS

Ohne dass was bleibt

Wege zum CO₂-freien Kraftwerk



Laserkommunikation hebt ab

Es ist eine Technologie mit großem Potenzial: die schnelle Datenübertragung mittels Laserkommunikation von fliegenden Plattformen zu datenhungrigen Bodenstationen. Um den Datentransfer zwischen Bodenstationen, Flugzeugen, Satelliten und anderen fliegenden Plattformen zu verbessern, forscht das Oberpfaffenhofener DLR-Institut für Kommunikation und Navigation auf dem Gebiet der optischen Freiraumkommunikation. Die Technologie kann, verglichen mit nicht-optischen Verfahren wie Radio- oder Mikrowellenverbindungen, die Übertragungskapazitäten um Größenordnungen steigern. Das bedeutet einen hundert- bis tausendfach schnelleren Datentransfer!

Im DLR Oberpfaffenhofen erkunden Experten den Einsatz optischer Datenübertragung zwischen Luft und Boden

Von Florian Moll und Christian Fuchs

Das Prinzip ist einfach: Wie bei den terrestrischen Glasfasernetzen werden die physikalischen Eigenschaften von Licht zur Datenübertragung verwendet.

Der Unterschied ist lediglich das Übertragungsmedium: Anstatt die Lichtwellen durch Glasfaserkabel zu schicken, werden sie durch den freien Raum gesendet.

Will man mehr Information pro Zeiteinheit transportieren als es beispielsweise mit Radiowellen möglich ist, wird Licht als elektromagnetische Strahlung mit höherer Frequenz zum Hoffnungsschimmer am Horizont. Jüngste Experimente Oberpfaffenhofener DLR-Wissenschaftler zeigen, dass die optische Kommunikation zur Datenübertragung vom Flugzeug zum Boden genutzt werden kann, etwa um HDTV-Videos oder hochauflösende Radardaten in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Hohe Energie-Effizienz, kompakte Bauweise, keine Kosten für Funklizenzen und zudem äußerst hohe Datenraten – das könnte die Datenübertragungssysteme von Morgen auszeichnen. Die Anwendung von Laserkommunikation in der Luft- und Raumfahrt ist seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand der Forschung. Indem Intensität und Phase des Laserlichts moduliert werden und dieses durch den freien Raum gesendet wird, lassen sich orts-feste oder mobile Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aufbauen. So können Daten zwischen Kommunikationsknoten auf Gebäuden, Flugzeugen, Satelliten oder anderen Partnern ausgetauscht werden.

Erste Studien auf dem Gebiet der optischen Inter-Satelliten-Verbindungen führte das DLR bereits in den 70er-Jahren durch. Ende 2008 konnte erstmals gezeigt werden, dass optische Kommunikation auch im aeronautischen Bereich zwischen Flugzeug und Boden realisiert werden kann. Vom DLR-Institut für Kommunikation und Navigation wurden dafür bis dato weltweit einzigartige Experimente durchgeführt, um die Anforderungen an zuverlässige Verbindungen in diesem Szenario zu definieren. Dabei konnte eine Kommunikationsverbindung zwischen dem DLR Forschungsflugzeug Do 228-212 und der opti-

Teleskop und Montierung der transportablen Bodenstation TOGS



Das DLR-Forschungsflugzeug Do 228-212 beim Testbetrieb des Experimentaleinbaus zur optischen Kommunikation. Der Außenbau des Laserterminals befindet sich links unten am Rumpf.



Außenbau der Sendeeinheit. Der Sendestrahl tritt aus der Linse aus und kann in den gesamten unteren Halbraum gelenkt werden.



Laser Ethernet Transceiver (LET) im Inneneinbau. Hier werden die Nutzdaten (z. B. Kamerabilder, Radaraufnahmen) in ein für die Freistrahübertragung optimiertes Sendedatenformat gewandelt.



Optische Bodenstation Oberpfaffenhofen. Hinter dem Teleskop ist eine optische Bank angeflanscht, welche den Kommunikationsempfänger und die Messgeräte beherbergt.

schen Bodenstation auf dem Dach des Institutsgebäudes im DLR Oberpfaffenhofen aufgebaut und aus der Luft aufgenommene HDTV-Daten via Laserkommunikation in Echtzeit bereitgestellt werden.

Zusammenspiel von Luft- und Bodenseite

Das Gesamtsystem besteht prinzipiell aus zwei Hauptkomponenten: Der im Flugzeug eingebauten Laserquelle (Kommunikationssender) und des Empfangsteleskops am Boden (Kommunikationsempfänger). Die Laserquelle setzt sich aus einem Außenbau und einem im Flugzeuginneren angebrachten Sendebauteil zusammen. Der Außenbau ist im unteren Bereich des Flugzeugrumpfs befestigt. Geschützt durch einen halbkugelförmigen Präzisionsglasdom befindet sich dort zentriert eine 30 Millimeter große Sammellinse, welche über ein spezielles aktives optisches System, angetrieben von geregelten Torquemotoren (das sind getriebelose Direktantriebe) in jede Richtung durch eine fixe Durchführung im Flugzeugrumpf zu lenken. Dort, innerhalb der Kabine, lagern sowohl die vibrationsgedämpfte optische Bank, als auch die Elektronik, welche zur Steuerung der gezielten Strahlrichtung und Umwandlung von Nutzdatenformaten (wie etwa Radarbilder oder HDTV-Videos) in Sendeformate benötigt wird. Hier wird das aus Computernetzwerken und Internetverbindungen bekannte Kommunikationsprotokoll TCP/IP verwendet. Um den Besonderheiten des turbulenten atmosphärischen Übertragungskanal Rechnung zu tragen, gibt es ein spezielles Fehlersicherungsverfahren. Dieses sorgt dafür, dass Signaleinbrüche aufgrund atmosphärischer Einflüsse, welche zu Datenverlust führen, kompensiert werden können und somit eine fehlerfreie Datenübertragung möglich wird.

Das Flugterminal kennt die GPS-Position der Empfangsstation, so dass der Sender entsprechend ausgerichtet werden kann. Des Weiteren übermittelt es mithilfe einer traditionellen UHF-Funkverbindung seine eigene GPS-Position an die Boden-

station. Somit kann eine gegenseitige automatische Ausrichtung von Sender und Empfänger im Rahmen der Genauigkeit des GPS-Systems erreicht werden. Da zur Ausrichtung der Kommunikationspartner eine extrem hohe Genauigkeit von weniger als einem Hundertstel Grad notwendig ist, wird eine zweite Stufe eingesetzt. Es werden optische Sensoren auf beiden Seiten verwendet. Diese detektieren ein vom Partner ausgestrahltes Referenzsignal und können dessen einfallende Richtung auf wenige Tausendstel Grad genau bestimmen. Eine geschlossene Regel-Schleife sorgt dafür, dass die gegenseitige Ausrichtung bestehen bleibt, egal welches Manöver das Flugzeug durchführt. Mit dieser Technik konnten bis dato hochratige Verbindungen bei Distanzen bis über 100 Kilometer aufgebaut und gehalten werden. Datenraten von mehr als einem Gigabit pro Sekunde (Gbit/s) sollen als nächstes demonstriert werden. Zukünftige Systeme werden sogar bis in den Bereich von Terabit (eine Billion bit) pro Sekunde vorstoßen.

Die Empfangsstation am Boden hat ein optisches Spiegelteleskop mit einem 40-Zentimeter-Primärspiegeldurchmesser (Cassegrain-Typ), welches durch eine Kuppel geschützt ist. Das Teleskop ist in einer eigens entwickelten Gabelmontierung aus Aluminium befestigt und kann mittels zweier Freiheitsgrade (Azimuth und Elevation) alle Blickrichtungen über dem Horizont anpeilen. Das vom Flugzeug kommende Laserlicht wird vom Spiegelteleskop eingefangen und auf verschiedene Messinstrumente sowie den Kommunikationsempfänger gelenkt. Dort wird das optische Signal in ein elektrisches umgewandelt und demoduliert beziehungsweise dekodiert. Aus dem Sendeformat werden die Nutzdaten wieder extrahiert und den Nutzern zur Verfügung gestellt. Beispielsweise kann ein vom Flugzeug aus aufgenommenes HDTV-Video nun angesehen, gespeichert oder weiterverarbeitet werden.

In Zukunft sollen Flugzeuge und unbemannte Flugkörper mit der neuen Technologie ausgerüstet werden, um über lange Distanzen große Datenmengen zu übertragen, wie sie zum Beispiel bei Verkehrsüberwachung, luftgestütztem Katastrophenschutz und anderen Aufklärungsaufgaben anfallen. Auf diese Art und Weise können die jeweiligen Einsatzkräfte stets mit aktuellem und höchstauflösendem Bildmaterial versorgt werden.

Vom Luftraum ins Weltall

Auch der Bereich Daten-Downlinks von Satelliten stellt eine sehr interessante Anwendung für optische Kommunikationsverbindungen dar. Die möglichen Datenraten im Gbit/s-Bereich übertreffen die üblichen Datenraten um ein Vielfaches, während Gewicht und Leistungsverbrauch der Kommunikationssender an Bord des Satelliten klein gehalten werden können. Bodenstationenetzwerke, bestehend aus einigen Stationen an günstigen Orten in Europa, ermöglichen Linkverfügbarkeiten bis nahezu 100 Prozent. Zur Demonstration direkter optischer Satelliten-Downlinks führte das DLR im Jahr 2006 die europaweit ersten Versuche mit dem Satelliten OICETS (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite) der japanischen Raumfahrtagentur JAXA durch. Bei einer zweiten Kampagne im Jahr 2009 konnten weitere wertvolle Kenntnisse über das Verhalten der atmosphärischen Turbulenz gewonnen werden. Diese ergänzen das Wissen um das Verhalten des Kommunikationskanals und erleichtern es, DLR-eigene Satelliten-Terminals zu entwickeln. Diese sollen insbesondere auf kleinen Satelliten zum Einsatz kommen. ●

Autoren:

Florian Moll beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit optischer Freiraumkommunikation, als Student und wissenschaftlicher Mitarbeiter im DLR-Institut für Kommunikation und Navigation. Er wirkte in mehreren Projekten zur Erprobung aeronautischer Freistrahkommunikation mit. Christian Fuchs ist seit 2006 wissenschaftlicher Angestellter in demselben Institut und leitet seit April 2011 eine Forschungsgruppe zur Optischen Freiraumkommunikation.

Aktuelle Anwendungen bei Großveranstaltungen und abhörsicherer Übertragung

Im Projekt VABENE geht es darum, bei Massenveranstaltungen oder nach Naturkatastrophen Lageeinschätzungen aus der Luft vorzunehmen. Die Einsatzkräfte sollen so mit aktuellem Bildmaterial versorgt werden. Hierfür stehen ein vom DLR-Institut für Methodik der Fernerkundung entwickeltes Kamerasystem und ein vom DLR-Institut für Hochfrequenz- und Radartechnik entwickelter SAR-Sensor zur Verfügung. Die Echtzeitverwendung dieser Daten am Boden soll mittels hochratiger, optischer Kommunikation zwischen Flugzeug und Bodenstation gewährleistet werden.

Ein weiterer Forschungsgegenstand sind Verfahren der Quantenkryptographie (QKD) in diesem Luft-Boden-Szenario. Nutzdaten können damit absolut abhörsicher übertragen werden. Hierfür kann das sogenannte BB84-Protokoll verwendet werden, bei welchem polarisierte Photonen vom Flugzeug abgestrahlt und von der Bodenstation empfangen werden. Werden diese Photonen abgefangen und somit abgehört, wird das beim Empfänger angezeigt und die Aktivität eines Lauscher ist aufgedeckt. Die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und das DLR führten Anfang 2011 die weltweit ersten Flugzeug-Boden-Versuche zur Erprobung dieser Technologie erfolgreich durch. Die Wissenschaftler der LMU integrierten in diesem Experiment ihr QKD-System in die Bodenstation und in das Flugterminal.



Teleskop zur optischen Kommunikation im Labor



Die transportable optische Bodenstation, bereit zum Empfang

Eine Bodenstation zur optischen Freiraumkommunikation – das Einfache, das schwer zu machen ist

Von Martin Brechtelsbauer, Joachim Horwath und Dirk Giggenbach

Höchste Datenraten absolut zuverlässig empfangen zu können, ist eigentlich herausfordernd genug. Dies für praktisch jeden Punkt der Erde zu realisieren – das war zunächst nur eine Vision. Doch für die Wissenschaftler des DLR-Instituts für Kommunikation und Navigation war sie verlockend genug, um den Bau einer transportablen Bodenstation für die optische Kommunikation anzugehen.

Superschnelle Kommunikation über kurze Strecken, Links zu Flugzeugen oder anderen hochfliegenden Plattformen, Satellitendownlinks – die Einsatzmöglichkeiten von Bodenstationen sind vielfältig. Wenn man sie an nahezu jeden Punkt der Erde transportieren kann, sind Datendownlinks überall dort möglich, wo es gerade Not tut: Bei Kriseneinsätzen zum Beispiel, wo Rettungsmannschaften schnell und in Echtzeit Luftaufnahmen des Katastrophengebiets zur Lagebeurteilung benötigen. Aber auch zur Evaluierung von Standorten für neue optische Bodenstationen kann eine solche Bodenstation genutzt werden. Doch die bisherige Labortechnologie in den rauen Outdoor-Einsatz zu bringen, ist nicht gerade einfach.

Bislang standen zur optischen Kommunikation mit verschiedenen Kommunikationspartnern nur sehr große, stationäre Teleskope wie die optische Bodenstation der ESA in Teneriffa oder die Optical Ground Station des Instituts für Kommunikation und Navigation im DLR Oberpfaffenhofen, kurz OGS-OP, zur Verfügung. Diese Stationen können aufgrund ihrer Bauart gar nicht oder nur mit großem Aufwand an einen anderen Einsatzort gebracht werden und eignen sich aufgrund der eingesetzten Komponenten nicht für den Feldeinsatz. Eine weitere Herausforderung stellt der Unterbau dar: Während stationäre Teleskope wegen der hohen Anforderungen an die Ausrichtgenauigkeit auf massiven Stahlbetonfundamenten errichtet werden, muss eine transportable Station möglichst leicht sein, ohne aber gegenüber einer Stahlkonstruktion Defizite in Stabilität und Biegesteifigkeit zu haben.

Weitere Herausforderungen stellten sich bei der Konstruktion des Teleskops selbst: Es sollte eine besonders kurze Bauform haben und die Möglichkeit bieten, die gesamte Einheit in einem kompakten, transportablen Behälter unterzubringen. Es galt also, eine transportable Station zu entwickeln, die trotz ih-

rer kompakten Bauweise die nötige Stabilität und Genauigkeit bei geringem Gewicht aufweist und einfach zu transportieren ist. Eines der Einsatzgebiete für eine solche Station ist die Datenübertragung in hohen Bitraten von und zu flugzeuggetragenen Systemen oder Satelliten.

Hochfest und doch flexibel

Konventionelle Trägermaterialien hatten hier keine Chance. High-Tech-Materialien mussten her. So besteht die gesamte Träger- und Mastkonstruktion aus einem hochfesten Kohlefaserverbundwerkstoff (CFK). Dieser weist gegenüber Aluminium eine wesentlich höhere Steifigkeit bei weniger Gewicht auf. Zudem hat der Werkstoff ein stark reduziertes Schwingungsverhalten, was der ruhigen Lage der Konstruktion zugute kommt.

Die Kohlenstofffasern in den Komponenten wurden entsprechend den auftretenden Beanspruchungen gelegt. Ein weiteres Kriterium für die Konstruktionsauslegung war die thermische Ausdehnung der Materialien. Die erforderliche Genauigkeit könnte nicht erreicht werden, wenn sich der Unterbau des Teleskops bei wechselnden Temperaturen verformen würde. Auch diese Herausforderung konnte durch entsprechendes Verlegen der Kohlenstofffasern gemeistert werden.

Und noch etwas ändert sich grundlegend: Stationäre Bodenstationen ändern ihre Ausrichtung nie. Ist die Blickrichtung der Optik mittels einer Kalibrierung beispielsweise anhand der Sterne einmal genau bestimmt, können Kommunikationspartner wie Satelliten sehr schnell und präzise „anvisiert“ werden. Die mobile Bodenstation muss je nach Einsatzort in unterschiedlichen Orientierungen aufgestellt werden. Bei der Einmessung hilft ein System, das geschickt die Daten aus in der Station integrierter Neigungssensorik und differentiell GPS verknüpft

Eine mobile optische Bodenstation muss schnell einsatzfähig sein

und so die Ausrichtung und Lage der Station bestimmt. Für erhöhte Genauigkeit wurde auch ein GPS-gestütztes „Lasertarget“ entwickelt, das mit dem Lasersystem der Station zur Einmessung verwendet werden kann.

Teleskop der Extraklasse und Präzisionsantriebe

Das Herzstück der Anlage ist das Teleskop mit einem Primärspiegeldurchmesser von 60 Zentimetern. Dieses soll für den Einsatz auf eine Höhe über Grund von 3,5 Meter gebracht und für den Transport sicher verstaut werden. Dazu wurde eine Mechanik entwickelt, die sich pneumatisch aus einem CFK-Schalenelement ausklappt, in dem beim Transport das Teleskop sowie die gesamte Datenübertragungs- und Steuerungstechnik untergebracht ist. Um die Station auch während des Transports zu schützen, wurde ein Außencontainer gefertigt, in dem das Schalenelement über ein pneumatisches Dämpfungssystem gelagert ist, das Transportstöße kompensiert. Zur Inbetriebnahme werden die in der Transportkiste integrierten Stützen montiert, die Klappen des Containers öffnen sich und das Teleskop wird automatisch wie ein Schweizer Taschenmesser ausgeklappt. So ist die Station in kurzer Zeit einsatzbereit.

Die wichtigste Anforderung an das Teleskop selbst ist ein für die kurze Bauform maximal großer Spiegeldurchmesser. Die Wahl fiel auf die Ritchie-Chrétien-Bauart. Diese zeichnet sich durch eine kurze Baulänge und gute optische Korrektur aus. In astronomischen Teleskopen ist der meist aus Glas gefertigte Hauptspiegel nicht fest montiert, sondern wird in einer Aufhängung aus Druck- und Zugschrauben justiert. Eine solche Befestigung würde sich beim Transport des Teleskops allerdings unweigerlich verstellen. Daher beschlossen die Ingenieure, den Hauptspiegel aus Aluminium zu fertigen und fest zu montieren. Das Teleskop wird ausschließlich über die Sekundärspiegel ausgerichtet, was die Gefahr der Dejustage während des Transports minimiert.

Die Fertigung der Spiegeloberflächen aus Spezialaluminium erfolgt durch spanabhebende Bearbeitung des Rohlings auf einer Präzisionsdrehbank. Zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) in Jena wurde das Verfahren soweit optimiert, dass die Oberfläche in einem einzelnen Durchgang gefertigt werden kann. Es sind im Gegensatz zur herkömmlichen Spiegelfertigung keine Korrekturmessungen und Nachbearbeitungen nötig, was Kosten spart.

Um das Teleskop schließlich auf den Kommunikationspartner ausrichten zu können, ist es auf einer zweiachsigen Gabelmontierung befestigt. Bereits 2007 wurden am Institut für Kommunikation und Navigation erstmals Direktantriebe (Torquemotoren) für hochpräzise und spielfreie Antriebe in der optischen Freiraumkommunikation eingesetzt. Diese erlauben eine hochgenaue Ausrichtung des Teleskops in zwei Achsen. Die Präzision der verwendeten Direktantriebe und deren Spielfreiheit gewährleistet eine hervorragende Genauigkeit beim Positionieren. Die für den Antrieb verwendeten Torquemotoren sind auf kleine Drehzahlen und hohes Drehmoment optimierte Servomotoren. Durch die Verwendung von hochauflösenden Encodern auf der Abtriebsseite lässt sich so das Teleskop dem Kommunikationspartner präzise und schnell nachführen. Zudem sind die entwickelten Antriebseinheiten sehr kompakt und lassen sich durch ihre Hohlwellenbauform in die Drehmechanik integrieren.

Wenn der Einsatzort mit einem Fahrzeug erreichbar ist, steht auch ein Transportfahrzeug mit integriertem Arbeitsraum für das Bedienpersonal zur Verfügung. Es dient gleichzeitig als



Transporter für die Bodenstation, die entweder auf dem Fahrzeug oder abgesetzt betrieben werden kann. Das Gesamtsystem aus Transporter und Kommunikationseinheit wird im Rahmen einer DLR-Großinvestition entwickelt und soll 2012 fertig gestellt werden. Derzeit laufen die ersten Testkampagnen. Der erste Einsatz ist im DLR Projekt VABENE für das luftgestützte Verkehrsdatenerfassungssystem geplant. Durch die hohe Datenrate der Sensoren ist die optische Übertragung der Daten vom Flugzeug zur Bodenstation eine Schlüsselkomponente für das Echtzeitsystem. Die optische Freiraumkommunikation ergänzt in idealer Weise den konventionellen Mikrowellenrichtfunk der immer mehr an seine Grenzen stößt. Somit werden unter anderem kompakte Flugterminals mit hoher Datenrate möglich, deren Übertragungstechnik nicht der behördlichen Frequenzulassung für Funksysteme unterliegt und somit weltweit und sofort eingesetzt werden kann. ●

Autoren:

Martin Brechtelsbauer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe Angewandte Optische Freiraumkommunikation. Er beschäftigt sich seit 2005 mit der Entwicklung von elektronischen Baugruppen für die Laserkommunikation und leitet das Projekt TOGS – Transportable Optische Bodenstation. Joachim Horwath ist seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kommunikation und Navigation. Er leitete zahlreiche Projekte, in denen neue Terminals für optische Freistrahlkommunikation entwickelt und die Einflüsse der Atmosphäre auf die Übertragung studiert wurden. Dr.-Ing. Dirk Giggenbach ist Leiter der Gruppe Grundlagen der Optischen Freiraumkommunikation im Institut für Kommunikation und Navigation. Seine Forschungsgruppe befasst sich mit zukünftigen Anwendungen der Laserkommunikation wie hochgenaue optische Frequenzübertragung, Adaptive Optik und optische Feeder-Links.

Weitere Informationen:

www.DLR.de/KN