

**Zeitschrift:** Comtec : Informations- und Telekommunikationstechnologie = information and telecommunication technology  
**Herausgeber:** Swisscom  
**Band:** 76 (1998)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Optische Satellitenkommunikation  
**Autor:** Aschmoneit, Ernst-Karl  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-877308>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## SILEX-System

# Optische Satellitenkommunikation

Seit Jahrzehnten stellen Nachrichtensatelliten Weitverkehrsverbindungen für Festnetzdienste her, später ermöglichten sie den grossflächigen Direktempfang von Fernsehprogrammen, und in jüngster Zeit kamen noch weltweite Mobilfunkdienste hinzu, die Sprachkommunikation über Mobiltelefone von jedem Ort der Erde aus zulassen sollen. Eine weitere Aufgabe dürften globale Breitbandnetze sein, die Teilnehmern Anschlüsse mit Datenraten bis zu 155 Mbit/s bereitstellen. Benutzt werden dafür bisher vor allem Satelliten in geostationärer, künftig aber auch zunehmend in erdnahe Umlaufbahn (geostationary bzw. low earth orbit, kurz GEO und LEO).

**W**ährend sich GEO-Satelliten in rund 36 000 km Höhe mit gleicher Winkelgeschwindigkeit wie die Erde bewegen und deshalb über ihrem äquatorialen Fusspunkt zu stehen scheinen, umrunden LEO-Satelli-

---

ERNST-KARL ASCHMONEIT

---

ten je nach ihrer Höhe die Erde mehrmals am Tag. Zu den Vorteilen der auf LEO-Satelliten gestützten Netze gehören kurze Signallaufzeit, geringe Sendeleistung und einfache Antennen. Allerdings erfordert das System eine Vielzahl von Satelliten, um die vollständige globale Bedeckung zu gewährleisten.

Der Informationsaustausch lief ursprünglich nur zwischen den Satelliten und Bodenstationen ab, neuerdings aber auch zwischen den Satelliten untereinander, wobei man von «Inter-Orbit Links» (IOL) spricht, wenn sie auf unterschiedlich hohen Bahnen umlaufen und deshalb ständig ihre gegenseitige Lage und Entfernung ändern, was eine hochpräzise Strahlausrichtung und -nachführung verlangt, sowie von «Inter-Satellite Links» (ISL) bei gleich hohem Orbit mit nahezu fester Strahlausrichtung. Ebenso wie diese Nachrichtensatelliten benutzen nicht nur alle anderen Nutz-, sondern auch Forschungsatelliten und interplanetare Sonden derzeit für die Übermittlung ihrer Daten überwiegend Mikrowellen im Frequenzbereich von 20 bis 30 GHz. Da die Atmosphäre höhere Frequenzen stark dämpft, kommen für Verbindungen zwischen Satelliten und Bodenstationen auch weiterhin vorwiegend Mikrowellen in Betracht.

Doch weil IOL- und ISL-Verbindungen ausserhalb der Erdatmosphäre liegen, steht dort die Frequenzwahl frei. Immerhin bieten optische Übertragungssysteme, die mit Frequenzen im Tera- bis Petahertz-Bereich arbeiten, zahlreiche Vorteile. Sie kommen bei sehr grossen Datenraten mit kleinen Terminalabmessungen und Sendeleistungen aus. Ausserdem entfallen Interferenzen mit anderen Systemen und Frequenz-Koordinierungsprobleme. Bei Freiraumübertragungen nimmt die erforderliche Sendeleistung bei gleichem Antennen-Durchmesser quadratisch mit der Frequenz ab. Verantwortlich dafür ist die unterschiedliche Strahlaufweitung. So erzeugt eine

Antenne von 25 cm Durchmesser bei Mikrowellen um 30 GHz in 5000 km Entfernung (typischer Wert für LEO-Systeme) einen Strahldurchmesser von 500 km, bei optischen Frequenzen um 300 THz, die etwa 1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge entsprechen, von lediglich 50 m, wodurch ein wesentlich grösserer Teil der Sendeleistung unmittelbar in die Empfangsantenne einfällt.

## Systementwicklung im Auftrag der ESA

Um die Vorteile optischer Übertragungsstrecken auch im Weltraum nutzen zu können, liess die Europäische Weltraumorganisation ESA von verschiedenen

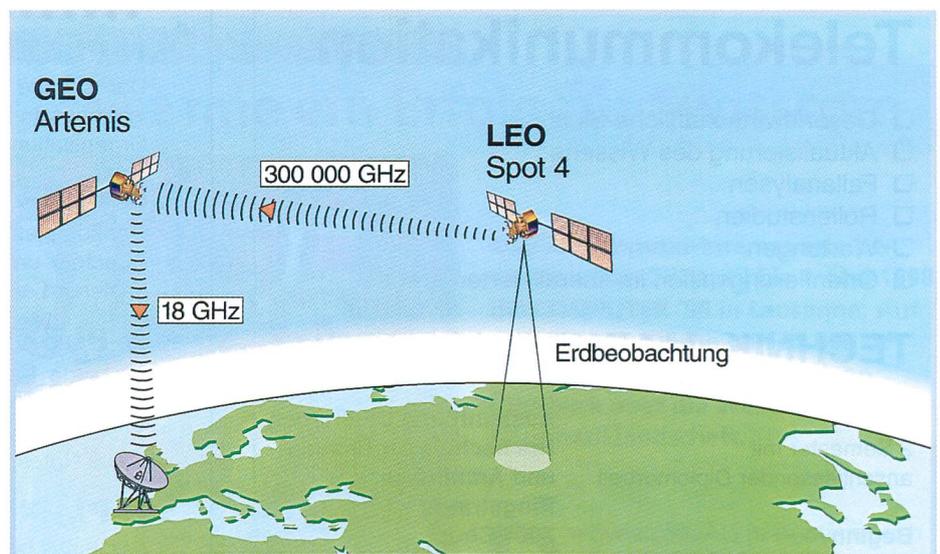


Bild 1. Schematische Darstellung der SILEX-Inter-Orbit-Versuchsstrecke zwischen dem in erdnahe Bahn umlaufenden Spot-4- und dem geostationären Artemis-Satelliten. Optische Übertragung: Entfernung 45 000 km; Sendeleistung 60 mW; Wellenlänge 0,85  $\mu\text{m}$ ; Datenrate 50 Mbit/s (Foto: Bosch).

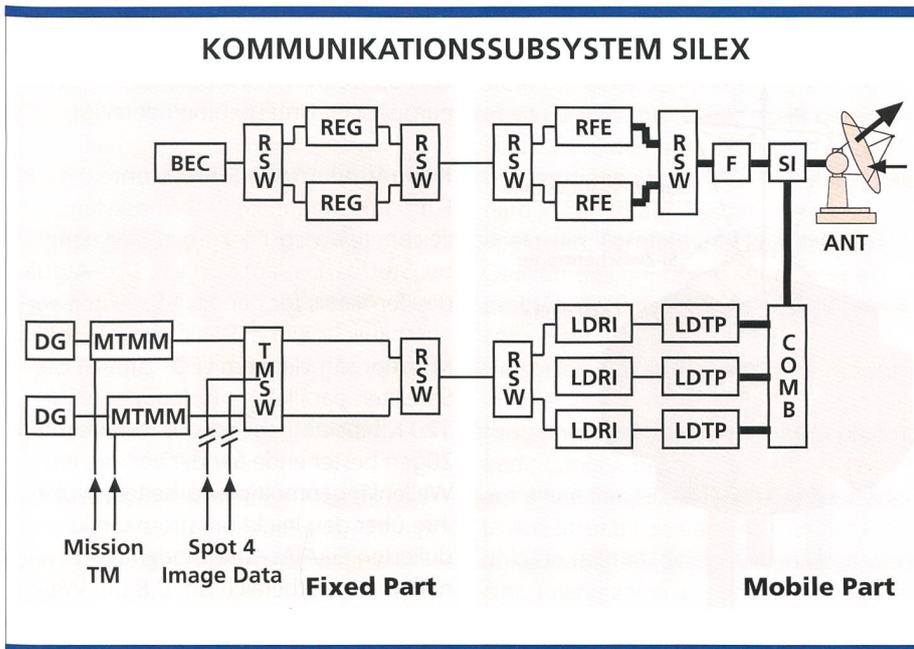


Bild 2. Bestandteile des SILEX-Kommunikations-Subsystems im LEO-Satelliten (Foto: Bosch).

Instituten und Unternehmen geeignete Vorschläge für derartige Systeme ausarbeiten. Schliesslich wurde Matra Marconi Space (MMS) in Toulouse unter Beteiligung mehrerer europäischer Firmen und Institute im Rahmen des SILEX-Projekts (Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment) mit der Entwicklung und dem Bau von Geräten für die Erstausrüstung von Satelliten zur Erprobung der optischen Kommunikation im Weltraum beauftragt. Ziel war es, Satelliten mit einem System für experimentelle und voroperationelle Zwecke auszurüsten. Im experimentellen Teil der Mission kam es darauf an, das Verhalten der optischen Endgeräte, die kurz- und langfristige Stabilität der elektrischen, mechanischen und optischen Komponenten und die Güte der Verbindung zu prüfen, ferner die Betriebsverfahren zu optimieren. Der voroperationelle Teil bestand darin, über die optische Verbindung Bilddaten des Erdbeobachtungsinstruments von SPOT-4 über einen im geostationären Umlauf «stehenden» Satelliten mit Datenraten von 50 Mbit/s in Echtzeit zum Datenverarbeitungszentrum bei Toulouse in Frankreich – wie auch in Gegenrichtung Steuerkommandos – zu übermitteln. Dadurch entfällt das sonst unerlässliche, rund um die Erde angelegte Netz von Bodenstationen.

Für den Lichtsender stand zunächst ein CO<sub>2</sub>-Laser auf dem Programm, weil da-

mals allein Gaslaser die benötigte Leistung bereitstellen konnten. Bald ging man auf diodenlasergepumpte Nd:YAG-Laser (neodymdotierter Yttrium-Aluminium-Granat) über. Seit ausreichend leistungsfähige Halbleiterlaser zur Verfügung stehen, die eine direkte Modulation über den Treiberstrom erlauben, haben Gas- und Festkörperlaser an Attraktivität verloren. Eine von der ESA veranlasste Studie zum Vergleich der Laserarten ergab klare Vorteile für Halbleiterlaser in bezug auf Masse, Energieverbrauch und Zuverlässigkeit. Ausserdem liess die ESA prüfen, ob der Homodyn- oder Heterodyn-Überlagerungsempfang mit Amplituden-, Phasen- oder Frequenzmodulation am besten geeignet ist. Man entschied sich für das Homodyn-Prinzip, bei dem der Lokaloszillatorlaser genau auf die Frequenz des Empfangssignals abgestimmt wird. Gegenüber dem Heterodyn-Prinzip, bei dem eine feste Differenz zwischen den Frequenzen des Empfangssignals und des Lokaloszillators vorliegt, erhöht es die Empfindlichkeit um 3 dB.

Im März 1989 begann das European Space Research and Technology Centre (Estec) der ESA im niederländischen Noordwijk mit erdgebundenen Versuchen über eine optische Weglänge von 500 m. Als Sender diente ein Gallium-Aluminium-Arsenid-Laser mit 25 mW Ausgangsleistung, der infrarotes Licht im Be-

reich von 0,8  $\mu\text{m}$  bis 1,3  $\mu\text{m}$  emittiert, als Empfänger wahlweise ein Silicium-Fotodetektor oder eine CCD-Kamera. Mit den gleichen Geräten folgten im Mai Freilandmessungen zwischen zwei relativ hohen Punkten auf dem Universitäts-Campus von Barcelona und dem 5 km entfernten Berg Montjuic. Noch im Juni 1989 verlegte man den Messort auf die Kanarischen Inseln und überbrückte 145 km zwischen dem Observatorio del Teide auf Teneriffa und dem Roque de los Muchachos auf Las Palmas. Nach den anfänglichen SILEX-Planungen war vorgesehen, gleich bei den ersten Versuchen nicht nur ein Inter-Orbit-Link (IOL) als LEO-GEO-, sondern auch ein Inter-Satellite-Link (ISL) als GEO-GEO-Verbindung zu erproben. Die ISL-Strecke sollte bidirektionalen Betrieb mit 120 Mbit/s ermöglichen. Budgetgründe zwangen dazu, sich vorerst auf eine IOL-Strecke zu beschränken (Bild 1) und auf ihr statt vier Kanälen lediglich einen Kanal zu übertragen. Das macht es allerdings unmöglich, diese Verbindung im Wellenlängen-Multiplex zu betreiben. Sie ist für die Übertragung von Bild- und Testdaten mit einer Geschwindigkeit von 50 Mbit/s in LEO-GEO- und von 2 Mbit/s in GEO-LEO-Richtung über Entfernungen bis zu 45 000 km ausgelegt. Mit der Bodenstation hält Artemis Kontakt über Mikrowellen im Bereich von 18 GHz. Als SILEX-Gegenstelle will die ESA den zur Data-Relay and Technology Mission (DRTM) gehörenden, derzeit noch im Bau befindlichen «Artemis»-Satelliten Ende 1999/Anfang 2000 in eine geostationäre Bahn befördern lassen und ihn auch für Übertragungsversuche mit dem von der japanischen Raumfahrtagentur NASDA gebauten, ebenfalls in erdnaher Bahn umlaufenden Satelliten OICETS

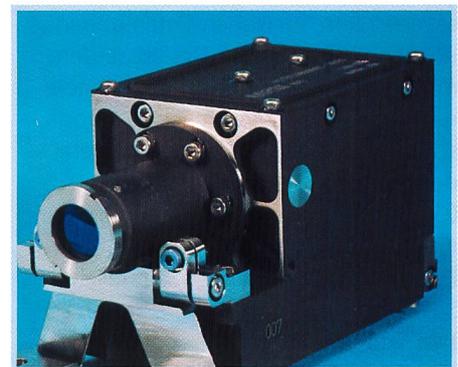


Bild 3. Flugmodell des optischen SILEX-Empfängers RFE (Receiver Front End) (Foto: Bosch).

LASERDIODE

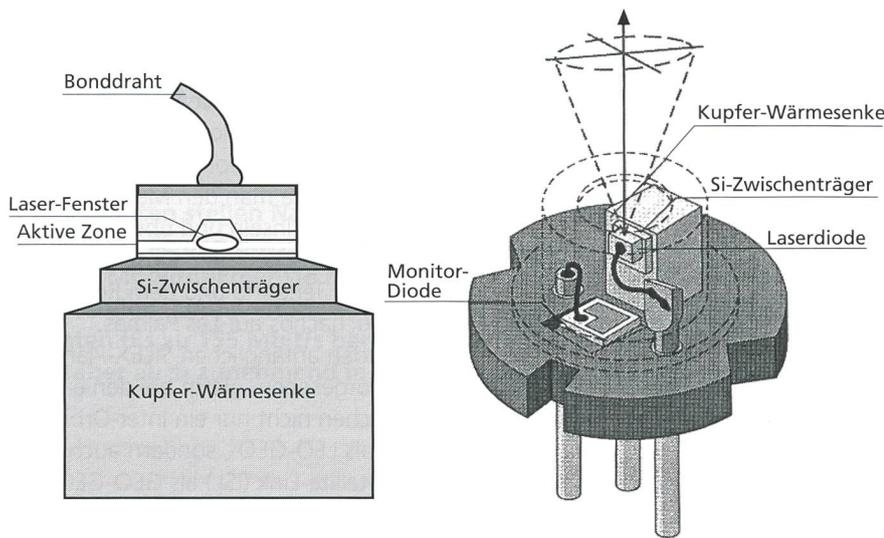


Bild 4. Aufbau der Laserdiode für das SILEX-System (Foto: Bosch).

nutzen. Die eigentliche Aufgabe von Artemis besteht darin, kostengünstige flächendeckende Mobilfunk-Satellitendienste zu demonstrieren und einen Beitrag zur europäischen Satellitennavigation zu leisten. Während Mobilfunk-Zellularsysteme in dünn besiedelten Gebieten unwirtschaftlich sind, können Satelliten grosse Gebiete mit geringem Aufwand versorgen. Ziel der ESA ist es, mit Artemis ein paneuropäisches Satellitensystem für die Kommunikation mit Landfahrzeugen, also mit Personen- und Lastwagen sowie mit Eisenbahnzügen, vorzubereiten. Deshalb gehört zur Ausrüstung von Artemis ein Übertragungssystem für den beweglichen Landfunkdienst. Es sichert zuverlässigen Nachrichtenverkehr zwischen Fahrzeugen und ortsfesten Funkstellen in Westeuropa und den angrenzenden Regionen im Mittelmeerraum, im Nahen Osten und in Russland bis zum Ural. Der ausserdem mitgeführte Transponder für hochgenaue Navigationsdienste ist als europäische Antwort auf die bereits existierenden Satelliten-Navigationssysteme GPS (Global Positioning System) der USA und GLONASS Russlands gedacht. Die an Bord der Satelliten befindlichen SILEX-Terminals bestehen aus je einem Kommunikations-, Optik- und PAT-Sub-

system, im Artemis ergänzt durch einen Bakensender. PAT ist die Abkürzung für «Pointing, Acquisition and Tracking», also sinngemäss für Ausrichtung, Kontaktaufnahme und -haltung. An Entwick-

lung und Bau der Fluggeräte waren unter der Gesamtleitung von Matra Marconi Space (MMS) in Toulouse mehrere europäische Unternehmen beteiligt.

**Kommunikations-Subsystem**

Für das Kommunikations-Subsystem zeichnete Bosch Telekom in Backnang bei Stuttgart verantwortlich. Den Aufbau des Terminals für den LEO-Satelliten veranschaulicht Bild 2. Das ursprüngliche Konzept sah vier vom LEO- zum GEO-Satelliten parallel mit Datenraten von 120 Mbit/s betriebene, aus redundanten Zügen bestehende Sender vor, die im Wellenlängenmultiplex arbeiten, wobei ihre über den Injektionsstrom direkt modulierten GaAlAs-Laserdioden Licht im nahen Infrarotbereich um 0,8  $\mu\text{m}$  Wellenlänge mit Linienabständen von 8 nm emittieren. Aus Kostengründen erhielt das Experimentalsystem auf LEO jedoch nur einen Senderzug, der QPPM-modulierte Daten (Quaternary Pulse Position Modulation) mit 50 Mbit/s überträgt, und zwar auf 819 nm Wellenlänge. Die Gegenrichtung vom GEO-Satelliten benutzt einen 847-nm-Träger. Die zunächst jeweils als Brettschaltungen ausgeführten Funktionsstufen der SILEX-



Bild 5. Montagearbeiten am SILEX-Teleskop (Foto: Zeiss).

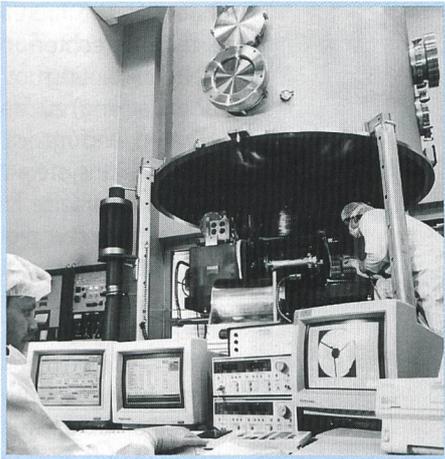


Bild 6. Einsetzen des SILEX-Teleskops in die Thermal-Vakuumkammer zur Durchführung von Belastungstests (Foto: Zeiss).

Einheiten übertrafen bei Messungen im Labor alle gestellten Spezifikationen. Wie aus Bild 2 hervorgeht, befinden sich einige Stufen des Sende- und Empfangszweigs auf dem festen, andere auf dem mobilen, zusammen mit dem Teleskop den Bewegungen der Gegenstelle nachgeführten Teil des optischen Terminals. Der Senderzug ist redundant ausgelegt mit Datengenerator DG, Modulator MTMM für die Überlagerung von Telemetriesignalen mit 500 kbit/s und Auswahlwähler TMSW, der dem Sendepfad die vom Datengenerator erzeugten Sequenzen oder Bilddaten von Spot-4 zu-leiten kann. Das ausgewählte Signal gelangt über die durch ein flexibles Koaxialkabel verbundenen Redundanzschalter RSW zu einem von drei Lasertreibern LDRI mit zugeordnetem optischem Sendemodul LDTP. Dessen optisches Ausgangssignal wird über die optische Kombinationseinheit COMB und die wellenlängenabhängige, also Sende- und Empfangsrichtung trennende Richtungsweiche SI dem als optische Antenne ANT dienenden Teleskop zugeleitet. Umgekehrt erreicht das Empfangssignal über die Weiche SI ein Filter F zur Unterdrückung von Hintergrundlicht sowie den optischen Redundanzschalter RSW einen von zwei Empfängern RFE (Receiver Front-End) (Bild 3). Sein elektrisches Ausgangssignal durchläuft Regeneratoren REG bis zum Übertragungsfehler-Auswerter BEC. Die Empfänger benötigen für Datenraten von 50 Mbit/s und weniger als  $10^{-6}$  Fehlerhäufigkeit Eingangsleistungen von mindestens  $-59$  dBm.

Bei Direktempfang im Wellenlängenbereich um  $0,85 \mu\text{m}$  kommt das Silex-System mit einer Sendeleistung von nur etwa 60 mW aus. Dafür reicht bereits eine Laserdiode aus, die sogar bis zu 200 mW erbringen kann. Auf der Suche nach dem in bezug auf Ausgangsleistung, Spektrum, Fernfeld und Phasenfront-Qualität geeignetsten Diodenlaser erprobten die Entwickler bei Bosch Telecom mehr als 30 Typen verschiedener Hersteller. Drei davon mussten sich dann in einer zweijährigen Lebensdauerprüfung unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen bewähren. Die Wahl fiel auf einen Einzelstreifenlaser mit Upside-Down-Struktur aus amerikanischer Produktion (Bild 4). Seine Wellenlänge weist eine Toleranz von  $\pm 2 \text{ nm}$  und eine Alterungsdrift von maximal  $\pm 1 \text{ nm}$  auf; er lässt eine Betriebsdauer von 50 000 Stunden erwarten. Damit das optische Fenster im Gehäuse keine Strahldegradation verursachen kann, erwies es sich als zweckmässig, die Gehäusekappe zu entfernen. Zwar erzeugt die Diode bei Impulsbetrieb noch Nebenlinien, doch emittiert sie 95 % der Energie innerhalb eines 3 nm breiten Frequenzbands. Im Empfänger befindet sich eine übliche Lawinen-Fotodiode APD (Avalanche Photo Diode), die das schwach einfallende Lichtsignal der Gegenstelle direkt in elektrische Impulse umwandelt. Ihre Empfindlichkeit ist so gross, dass sie pro Bit nur 73 Photonen benötigt. Damit erreichte Bosch Telekom weltweit einen Empfindlichkeitsrekord für solche Systeme. Lediglich 5 Photonen/bit wären sogar bei Anwendung von kohärenten, nach dem Überlagerungsprinzip arbeitenden Empfängern möglich, die allerdings einen Laser als Lokaloszillator benötigen, also wesentlich komplexer sind als Direktempfänger. Im weiteren Verlauf wird das Signal demoduliert sowie sehr rausch- und leistungsarm verstärkt. Künftig könnten noch rauschärmere Fotodioden zur Verfügung stehen, deren Empfindlichkeit sich bis auf 3 bis 5 dB der theoretischen Schrotrauschgrenze annähern und dem Geradeausempfang bisher nur mit Überlagerungsempfängern erreichbare Werte erschliessen. Der Betrieb mit dem anfangs eingeplanten Wellenlängen-Multiplex würde Datenraten bis zu 500 Mbit/s erlauben. Sie liessen sich in künftigen Geräten durch gesteigerte Sendeleistung – beispielsweise mit Hilfe von Dioden-Arrays oder diodengepumpten Nd:YAG-Lasern –

noch weiter erhöhen. Das erweist sich insofern als notwendig, als Erdkundungs-Satelliten mit ihren zahlreichen in Richtig- und Falschfarben gemachten Landaufnahmen durchaus derartige Datenmengen bereitstellen. Die im Satelliten Spot-4 anfallenden Videodaten können gleichzeitig zur Messung der Bitfehlerrate und der Fehlerstatistik herangezogen werden.

### Optik-Subsystem

Zum Optik-Subsystem, das Carl Zeiss in Oberkochen beisteuerte, gehören der optische Kopf und das nach dem Cassegrain-Prinzip aufgebaute Teleskop (Bild 5), dessen Antennengewinn 100 dB beträgt. Es nimmt die Funktion der Sende- und Empfangsantenne wahr. Sein aus Zerodur-Keramik bestehender Tubus ist 400 mm lang und hat einen Durchmesser von 270 mm. Trotz einer Wandstärke von nur 1,9 mm muss er stabil genug sein, um den beim Raketenstart auftretenden Beschleunigungsspitzen bis zu 37 g, also bis zur 37fachen Erdbeschleunigung, sowie extrem hohen Schallpegeln widerstehen zu können. Der Primärspiegel mit 250 mm Apertur und einem Wellenfrontfehler von dem vierzigsten Teil der Wellenlänge erhielt am Erdboden einen leichten Formfehler, der im Orbit unter den dort herrschenden Bedingungen der Mikrogravitation verschwindet. Die extrem genaue Form entstand nicht durch die Hand eines erfahrenen Optikers, sondern durch eine computergesteuerte Ionenstrahl-Poliermethode. Sie

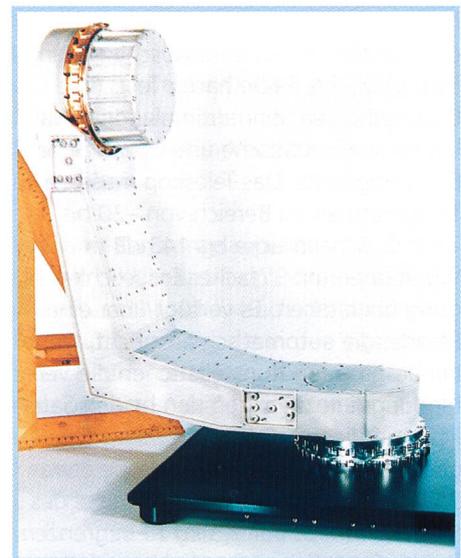


Bild 7. Mechanismus des PAT-Subsystems zur Grobausrichtung des Sendestrahl (Bild: Teldix).

nutzte die von Zeiss entwickelten Echtzeit-Interferenzmethoden. Sie erlauben es, noch Formabweichungen von 10 nm zu messen. Da der Laserstrahl im optischen Kopf mehrfach über Reflektoren umgelenkt wird, übliche Spiegel jedoch etwa 15% des Lichts verschlucken, galt es, diesen Wert möglichst auf 2% zu senken, um die optische Qualität des Strahls nur geringfügig zu beeinträchtigen. Mit dem Aufbringen dielektrischer Oberflächenschichten konnte die Firma Jenoptik in Jena die Rauheit jedoch so weit begrenzen, dass sie im Vergleich mit der Grösse des Bodensees nur 4 cm hohen Wellen entspricht. Als Toleranz für die gegenseitige Lage des Primär- und des Sekundärspiegels ist ein Wert von  $\pm 2 \mu\text{m}$  über den ganzen Temperaturbereich im Orbit zugelassen. Das Teleskop kann den Laserstrahl bis auf einen Öffnungswinkel von nur  $10 \mu\text{rad}$  (oder  $0,000\,057$  Grad) bündeln. Das ergibt eine Lichtkeule, die in mehr als 45 000 km Entfernung lediglich einen Kreis von 150 m oder von Stuttgart aus in Rom eine Fläche von 1,2 m Durchmesser ausleuchtet.

All diese Bedingungen erforderten eine extreme Genauigkeit im Strukturbau und beim Herstellen der optischen Teleskopoberflächen, ferner zum Abschluss der Fertigung eine Reihe harter Tests (Bild 6). Dazu gehörten Sonnensimulations-, Vakuum- sowie statische und dynamische Belastungstests. Das Teleskop musste Temperaturen im Bereich von  $-20$  bis  $+50^\circ\text{C}$ , Schalldrücke bis 143 dB und Vibrationen mit 37facher Erdbeschleunigung überstehen. Es verfügt über eine Blende, die automatisch anspricht, wenn bei bestimmten Konstellationen die Verbindungslinie zwischen den beiden Satelliten auf die Sonne weist. Während vergleichbare terrestrische Teleskope etwa 75 kg wiegen, gelang es, die Masse des SILEX-Teleskops auf 8,5 kg zu begrenzen. Insgesamt lieferte Zeiss drei komplette Teleskop-Flugmodelle an Matra aus, von denen das dritte als Reserve am Boden bleibt.

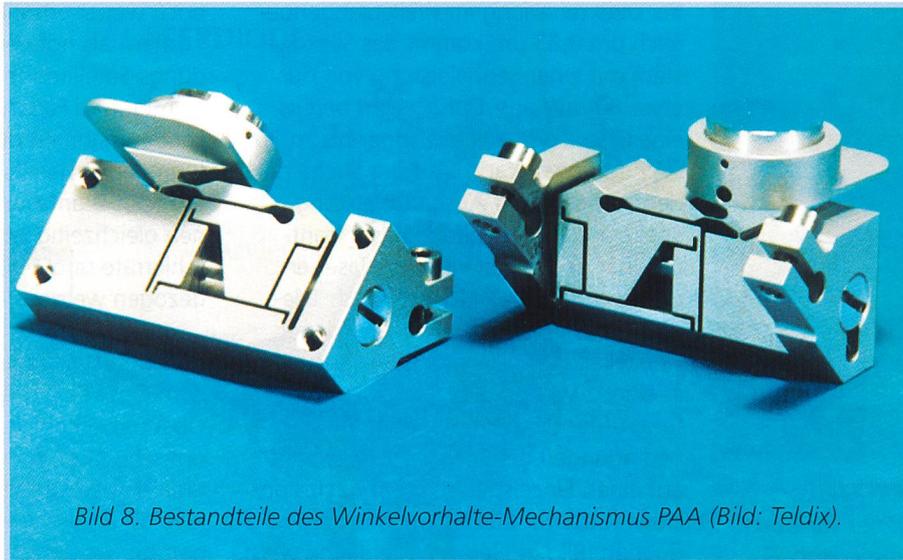


Bild 8. Bestandteile des Winkelvorhalte-Mechanismus PAA (Bild: Teldix).

### Ausricht- und Nachführ-Subsystem

Die kinematischen, dynamischen und optischen Anforderungen an die Spiegelverstellung des optomechanischen, von Teldix in Heidelberg entwickelten und gefertigten PAT-Subsystems sind beträchtlich. Immerhin ändert sich bei IOL-Verbindungen die Richtung von dem in 36 000 km Höhe synchron mit der Erde umlaufenden GEO- zu dem tiefer um die Erde «fliegenden» LEO-Satelliten, der je nach Bahnhöhe von einigen hundert Kilometern nur 2 bis 4 Stunden für einen Umlauf benötigt, innerhalb kurzer Zeit um mehr als  $180^\circ$  bei gleichzeitig bis auf 45 000 km anwachsendem Abstand. Infolge der gegenseitigen, zwischen 0 und 7000 m/s wechselnden Relativgeschwindigkeit der beiden Flugkörper bewegt sich der LEO-Satellit allein während der bis zu 0,25 s dauernden Laufzeit des Lichts vom Sender zum Empfänger in seiner Bahn um bis zu 2 km weiter. Das macht es erforderlich, den äusserst eng gebündelten Strahl der sendenden Teleskopantenne jeweils auf einen in der Bahn vorausliegenden Punkt auszurichten. Voraussetzung dafür ist, dass der Ausrichtsteuerung die Orbital-Parameter beider Satelliten stets exakt bekannt sind. Ausserdem ergeben sich daraus für das Signal kontinuierlich zu- und abnehmende Dopplerverschiebungen bis zu 10 GHz, weshalb die Frequenzregelung einen Bereich von  $\pm 10$  GHz erfassen und der Laser über mindestens 20 GHz abstimmbare sein muss.

Um die Verbindung zwischen dem GEO- und dem LEO-Satelliten zunächst in einer Strategie gegenseitigen Findens herstellen (Acquisition) und dann durch ge-

naues Nachführen sicher aufrechterhalten (Pointing and Tracking) zu können, verfügt das PAT-Subsystem über hochpräzise Mechaniken für die Grobausrichtung CFA (Coarse Pointing Assembly) (Bild 7), die Feinausrichtung FPA (Fine Pointing Assembly) und den Vorhaltewinkel PAA (Pointing Ahead Assembly) (Bild 8). Das FPA setzt sich aus dem Feinaus-

richt-Mechanismus FPM (Bild 9) und einer oder zwei Feinausricht-Antriebs-elektroniken FPDE (Bild 10) zusammen. Bei der Konstruktion dieser Komponenten war zu beachten, dass sie während des Raketenstarts erheblichen Belastungen und im Orbit jahrelang ausser dem Hochvakuum auch Temperaturschwankungen von  $-40$  bis  $+70^\circ\text{C}$  ausgesetzt sind, dabei aber keine Funktionsbeeinträchtigung erfahren dürfen. Die aus einem L-förmigen, am Satelliten angeflanschten Arm bestehende Grobausrichtung CFA in Bild 8 kann sich mit Geschwindigkeiten bis zu  $5^\circ/\text{s}$  drehen und derart das Teleskop zusammen mit der gesamten optischen Plattform auf den jeweils anderen Satelliten ausrichten, wobei der Winkelfehler noch etwa  $0,01^\circ$  beträgt. Ihn verringert die Feinausrichtung FPA mit zwei beweglich gelagerten, einen Winkelbereich von etwa  $10^\circ$  abdeckenden Spiegelementen während der schnellen Akquisitionssequenz auf den verlangten Wert von  $0,000\,057^\circ$ . Ausserdem muss sie imstande sein, die durch rotierende oder schwingende Komponenten verursachten Mikro vibrationen der Satellitenstruktur mit Frequenzen im Kilohertz-Bereich zu kompensieren, also den Strahl so ruhig zu halten, dass die Verbindung nicht abreisst, sowie innerhalb von 15 ms eine neue Position bis auf  $0,0007^\circ$  genau einzunehmen. Der Einstellvorrichtung für den Vorhaltewinkel PAA bleibt es überlassen, die Laufzeit des Lichts auszugleichen. Sie ist ebenfalls als Zweispiegelsystem aufgebaut, verfügt aber nur über einen Winkelbereich von  $0,37^\circ$  bei einem geringeren Fehler von  $0,00015^\circ$ . Der ständig

äusserst genau an die schnelle Bewegung des LEO-Satelliten anzupassende Vorhaltewinkel ist bis zu zehnmals breiter als der Sendestrahl.

Sobald der LEO-Satellit während seines Umlaufs über dem Horizont auftaucht, ist seine Lage nur innerhalb eines Winkels von etwa  $\pm 0,2^\circ$  bekannt. In diese Richtung sendet das Silex-Gerät des GEO-Satelliten einen im Winkel von 750  $\mu$ rad aufgefächerten Bakenstrahl aus, den insgesamt 19 Laserdioden mit je rund 700 mW optischer Nennleistung auf der Wellenlänge 850 nm gemeinsam erzeugen. Um mit dem Partner in Kontakt zu kommen, schwenkt der Strahl über einen Winkelbereich von 5500  $\mu$ rad, bis er den LEO-Satellit trifft. Dort spricht sofort ein Weitwinkeldetektor an, worauf das Terminal mit einem gleichfalls noch aufgeweiteten Strahl antwortet. Beide Seiten verfolgen den Strahl der Gegenstelle (tracking) und richten sich äusserst genau aufeinander aus, um dann ihre Strahlen scharf zu bündeln und dadurch die Leistung zu erhöhen. Damit kann der Informationsaustausch beginnen. Während der Kommunikationsphase regeln beide Terminals laufend die Strahlrichtung durch Auswertung der maximalen Empfangsleistung nach.

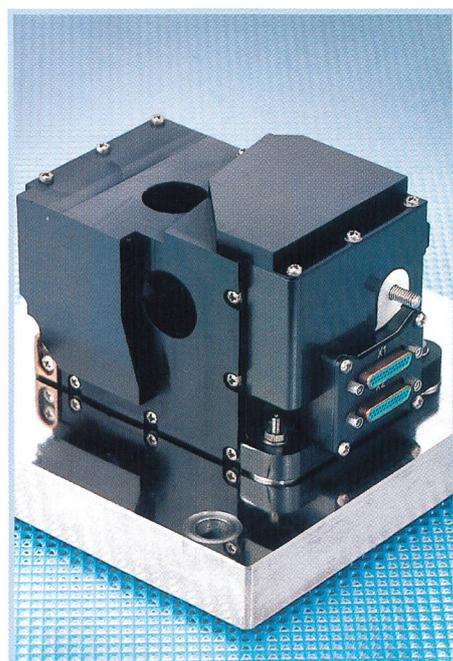


Bild 9. Feinausricht-Mechanismus FPM (Fine Pointing Mechanism) (Bild: Teldix).

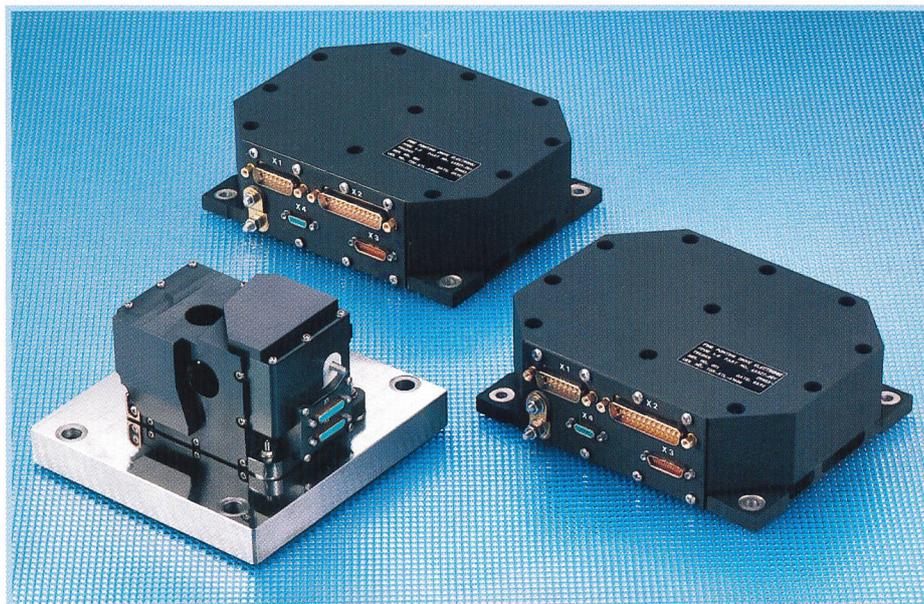


Bild 10. Feinausricht-Satz FPA (Fine Pointing Assembly), bestehend aus dem Feinausricht-Mechanismus FPM (vorn links) und den Feinausricht-Antriebselektroniken FPDE (dahinter) (Bild: Teldix).

### Optische Verbindung zur Bodenstation

Der GEO-Satellit steht mit der Bodenstation über Mikrowellen in Verbindung, und es erschien verlockend, wegen ihrer hohen Kapazität ebenfalls eine optische Strecke zwischen ihnen einzurichten, um die zu erwartende Datenfülle uneingeschränkt der Auswertung am Boden zugänglich machen zu können. Aber auch diese ursprünglich für Testzwecke eingeplante Strecke fiel den Sparmassnahmen zum Opfer. Die Bodenstation sollte auf der Kanaren-Insel Teneriffa in 2500 m Höhe eingerichtet werden. Zeiss lieferte auftragsgemäss im November 1993 ein 1-m-Spiegelteleskop für die Aufstellung in einer 12,5-m-Kuppel und übergab es am 30. Mai 1996 an die ESA. Es wäre die erste Station in Europa, die eine Datenverbindung vom Boden zu einem GEO-Satelliten mit optischen Frequenzen im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 1600 nm herstellen kann. Zu ihren Aufgaben hätte es auch gehört, die Energie des Laserstrahls, seine Polarisation und die Wellenfront-Qualität zu messen, ferner die LEO- und GEO-Satelliten zu verfolgen und ihre Bahndaten exakt zu bestimmen.

Die Verfügbarkeit der optischen Verbindung wäre allerdings sehr wetterabhängig, weshalb man mehrere, über ein weites Gebiet verteilte Bodenstationen vorsehen müsste. Der Satellit könnte dann

durch Bewertung der von ihnen ausgesandten Pilotstrahlen feststellen, welche Station jeweils gute Empfangsbedingungen bietet, um dann seinen Strahl dorthin zu richten. Doch selbst dann wäre nicht auszuschliessen, dass eine geschlossene Wolkendecke, ergiebige Schnee- oder Regenfälle wie auch dichter Nebel zuweilen alle nebeneinander bestehenden Strecken gleichzeitig unterbrechen könnten.

Vielversprechender dürfte es sein, die Satelliten mit hinreichender «Intelligenz» auszurüsten, damit sie imstande sind, die anfallenden Daten zu selektieren und zu konzentrieren und nur die für die Auswertung wichtigen Daten über stets verfügbare, wenn auch weniger leistungsfähige Mikrowellen-Verbindungen zu übertragen.

### Weitere Nutzungsaspekte

Die grosse Kapazität optischer Systeme würde es schliesslich auch gestatten, von Forschungs sonden, die in den interplanetaren Raum vorstossen, mehr Daten und eine grössere Anzahl von Aufnahmen mit verbesserter Auflösung als über Mikrowellensysteme zu erhalten. Wenn eine den Mars besuchende Sonde Mikrowellen von 30 GHz mit ihrer 1-m-Antenne aussendet, weitet sich der Strahl schon über die astronomisch verhältnismässig kurze Entfernung zur Erde bis etwa zum hundertfachen Erddurchmes-

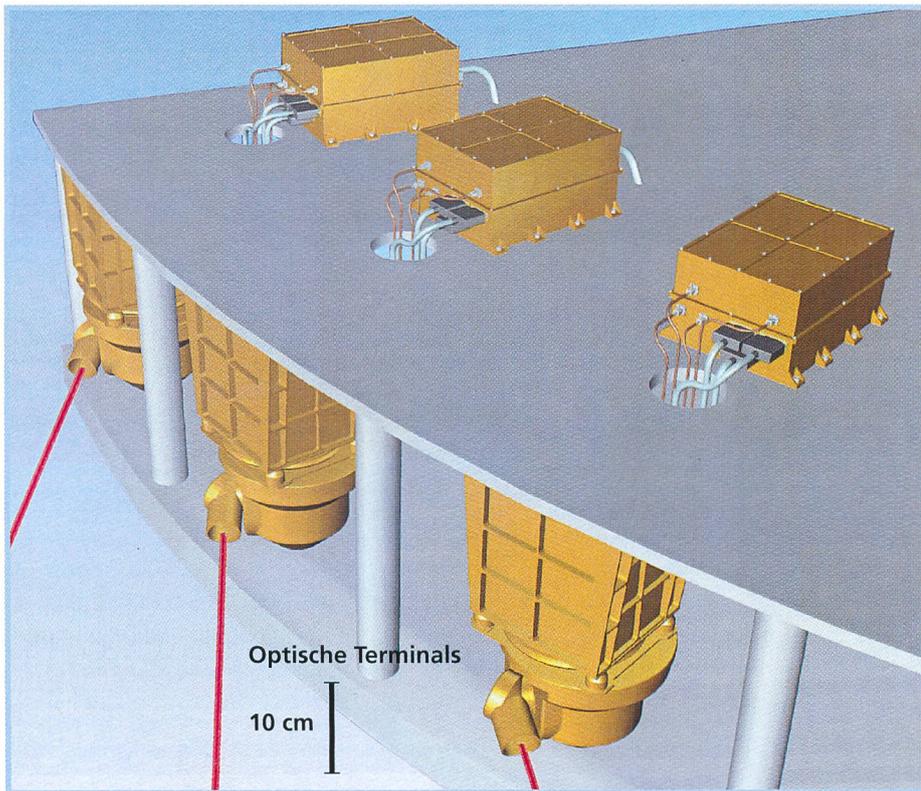


Bild 11. Teleskop-Anordnung auf der Satelliten-Plattform (Bild: Bosch).

ser auf. Dagegen würde ein 10-cm-Teleskop mit Infrarot-Licht von  $1 \mu\text{m}$  Wellenlänge lediglich den zehnten Teil des Erddurchmessers ausleuchten. Diese Relationen verschärfen sich bei Erkundungsflügen zu den äusseren Planeten des Sonnensystems oder zu Asteroiden und Kometen noch erheblich.

Sollten die Pläne eines bemannten Flugs zum Mars tatsächlich einmal in Erfüllung gehen, dann hängt das Gelingen der Mission nicht zuletzt von einer zuverlässigen, zweckmässigerweise ebenfalls optischen Nachrichtenverbindung ab. Sie ist nicht nur für die Übertragung der Forschungsergebnisse notwendig, sondern kann dazu beitragen, den psychischen Stress der Astronauten durch Kontakt mit ihren Partnern auf der Erde und durch Übermittlung von Informationen über Ereignisse auf dem Heimatplaneten zu mildern. Der Hinflug nimmt selbst bei günstigster Konstellation beider Planeten etwa sechs Monate in Anspruch. Da die Winkelgeschwindigkeit des Mars in seiner Bahn  $0,524^\circ/\text{Tag}$ , die der Erde aber  $0,986^\circ/\text{Tag}$  beträgt, verzögert sich der Rückflug über längere Zeit. Allerdings macht die Laufzeit der Signale eine dem Telefongespräch vergleichbare Kommunikation unmöglich, denn im Fall der

grössten, mehr als 400 Mio km betragenden Entfernung vergehen zwischen Frage und Antwort jeweils mehr als 40 min. Eine optische Verbindung wäre sogar imstande, Fernsehsendungen – nötigenfalls redundanzreduziert, also schmalbandig – zu übertragen. Während die Raumkapsel zum Mars fliegt oder ihn umrundet, kommt es

tage- oder gar wochenlang zum Ausfall der Verbindung, wenn der riesige Sonnenkörper sich zwischen Mars und Erde befindet. Um diese Unterbrechung zu verhindern, wird vorgeschlagen, zwei Relais-Satelliten in heliozentrischer Bahn so zu stationieren, dass wenigstens einer den Kontakt seitlich an der Sonne vorbei aufrechterhalten kann. Noch besser wären mehrere aktive Relais, die in gleichen Abständen voneinander auf einer gemeinsamen Bahn um die Sonne kreisen. Bei Anordnung der Relaiskette auf halber Entfernung zwischen Erde und Mars würden sich die günstigsten Dämpfungswerte ergeben. Da jedoch die Winkelgeschwindigkeit der Relais-Satelliten dort kleiner ist als die der Erde und grösser als die des Mars, müssten die Antennen ständig nachgeführt und auch immer wieder von einem Relais zum nächsten umgeschwenkt werden.

Zwar erscheint es unvermeidbar kostspielig, eine heliozentrische Richtfunkstrecke zu bilden, nur um in Kontakt mit Raumkapseln auf dem Weg zum Mars zu bleiben, doch versprechen sie vielfachen Nutzen. Dazu zählen die ständige, sich über Dekaden erstreckende Kommunikation künftiger Raumstationen im inneren Solarsystem sowohl mit der Erde als auch untereinander oder die Unterstützung von Flügen in die Tiefe des Raums. Ausserdem könnte jedes Relais eine Vielzahl wissenschaftlicher Instrumente tragen, die den interplanetaren Raum und die Aktivitäten der Sonne aus allen Richtungen kontinuierlich erforschen und ermittelte Daten zur Erde senden. Schliesslich

#### Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment

Am 24. März 1998 trug eine Ariane-Rakete den 2,8 t schweren Erdbeobachtungs-Satelliten SPOT-4 (Satellite pour l'observation de la terre) vom Weltraumbahnhof Kourou in Französisch-Guyana aus in eine etwa 700 km hohe Erdumlaufbahn. Er wurde von Matra Marconi hergestellt und ist ein Gemeinschaftsunternehmen von Frankreich, Belgien und Schweden. Während seiner auf mindestens fünf, möglichst aber zehn Jahre bemessenen Missionszeit soll er Bilder der Erdoberfläche mit etwa 1 km Auflösung aufnehmen und über den geostationären ESA-Satelliten «Artemis» zum Datenverarbeitungszentrum bei Toulouse in Frankreich übertragen. Ausser den dafür notwendigen Geräten hat er zusätzlich das erste Versuchssystem für optische Kommunikation im Weltraum an Bord. Dieses «Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment» (SILEX) soll die Praktikabilität optischer Verbindungen für den Datenaustausch zwischen Satelliten nachweisen.

würde sich ein solches Relaisystem ausgezeichnet als Gravitationswellen-Detektor eignen.

Die hochpräzise Nachführung eines Laserstrahls kann auch – gemäss einem im Institut für Technische Physik der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) erarbeiteten Vorschlag – bei der autarken Energieversorgung von Raumflugkörpern durch externe Stromversorgungs-Satelliten Anwendung finden. Sie sollen als im Orbit die Erde umkreisende Kraftwerke mit solargepumpten Festkörperlasern bestückt sein. Die Pumpenergie für den Laser könnte ein solardynamisches System liefern, auf das Parabolspiegel die mit  $1,35 \text{ kW/m}^2$  Leistungsdichte einfallende Sonnenstrahlung konzentrieren. Da die beiden durch den Lichtstrahl gekoppelten Satelliten meist auf unterschiedlichen Bahnen umlaufen, ist es unerlässlich, den energiereichen Laserstrahl laufend dem zu versorgenden Satelliten nachzuführen. Der Energie empfangende Satellit benötigt nur noch ein verhältnismässig einfaches und leichtes System zur Umwandlung der Licht- in Elektroenergie. Nach dem gleichen Prinzip wäre es möglich, Geräte und Anlagen auf dem Mond oder der Erde über gerichtete Lichtstrahlen aus dem – eventuell geostationären – Erdorbit mit Energie zu versorgen.

### Zukunftsaussichten

Nach erfolgreichem Abschluss des SILEX-Projekts ist ein steigender Bedarf an Systemen für die optische Kommunikation zwischen den zahlreichen Satelliten der geplanten interaktiven, weltweit für jedermann zugänglichen Multimedia-

Netze – Celestri mit 63, Skybridge mit 64 und Teledesic mit ursprünglich 840, neuerdings immerhin noch mit 288 Satelliten – zu rechnen. Sie müssten darauf ausgelegt sein, im Datenaustausch mit 6 bis 8 Nachbarn des Netzes Raten bis zu 10 Gbit/s sowie mit Teilnehmern auf der Erde Raten von 2 Mbit/s zu übertragen, wobei die Optik der Mikrowellentechnik klar überlegen ist. Mikrowellen-Funkgeräte für solche Intersatelliten-Strecken wären viel zu gross und schwer, verlangten eine zu hohe Leistungsaufnahme und hätten zu sehr aufgeweitete Strahlkeulen. Vorbereitend für diese Aufgabe entwickeln Bosch Telekom und die Oerlikon-Contraves AG, Schweiz, optische Terminals, die sie gemeinsam vermarkten wollen. Als Partner steuert Carl Zeiss wiederum die Teleskop-Antennen bei. Da jeder dieser Multimedia-Satelliten mit mehreren anderen um ihn herum in Verbindung steht, muss er auch die entsprechende Anzahl in verschiedene Richtungen orientierter Opto-Gerätesätze an Bord haben (Bild 11), so dass für diese Netze unter Umständen mehr als 400 Terminals benötigt werden.

Die in erdnahen Bahnen umlaufenden Satelliten der Multimedia-Netze bilden gemeinsam näherungsweise ein Netzwerk aus Super-Highways, das den Globus wie eine Kugelschale umgibt. Sie sind deshalb allenfalls bis zu 9000 km voneinander entfernt. Um bei Datenraten von 10 Gbit/s diese Entfernung überbrücken zu können, bedarf es einer Sendeleistung von 2 W und eines Teleskop-Durchmessers von 90 mm. Die Terminals arbeiten mit diodengepumpten Nd:YAG-Lasern, Zweiphasen-Modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying) und kohärentem Empfang. Das phasenmodulierte Ausgangssignal des Lasers wird auf die gewünschte Sendeleistung verstärkt, wofür sich Faser- oder Halbleiterlaser-, bei grösseren Werten auch Nd:YAG-Laserverstärker eignen. Als Lokaloszillator dient ein Nd:YAG-Laser mit besonders geringer Linienbreite. Ein derartiges Konzept gewährleistet hohe Empfängerempfindlichkeit, die bei 6 Photonen/bit liegen kann. Für die Elektronik zur Signalaufbereitung kommen im Hochgeschwindigkeitsbereich bipolare ASICs und GaAs-ICs (integrierte Gallium-Arsenid-Schaltungen), im Bereich niedriger Geschwindigkeiten weitgehend CMOS-ASICs zum Einsatz. Wegen des kohärenten Empfangs ist es nicht erforderlich, das Teleskop vor direkter Sonneneinstrahlung zu

schützen. Insgesamt werden die Terminals weniger als 18 kg wiegen und an Versorgungsleistung höchstens 100 W beanspruchen. Bei Verbindungen zwischen geostationären Satelliten sind die zu überbrückenden Entfernungen wesentlich grösser, jedoch die Datenraten niedriger. Deshalb lässt sich das Konzept für LEO-Terminals mit einigen Modifikationen, wie grösserem Teleskop-Durchmesser, auch auf GEO-Systeme übertragen. 9.3

Karl-Ernst Aschmoneit,  
Dipl.-Oberingenieur a.D.,  
Möln

## Summary

### SILEX system for optical satellite communication

For decades communications satellites have provided long-distance connections for stationary networks, later they also supported large-footprint direct reception of television programs and most recently, worldwide mobile communications networks were added that allow voice communication via mobile telephones from any place on the earth. Another function will be global broadband networks that offer subscriber connections with data rates of up to 155 Mbit/s. For this purpose, satellites in geostationary orbit and in the future increasingly also low-earth orbit (GEO and LEO) satellites will be used. Whereas GEO satellites are moving at an altitude of about 36,000 km at the same angular velocity as the earth and therefore appear to be stationary above their equatorial base point, LEO satellites circle the globe several times per day, depending on their altitude. Among the advantages of networks based on LEO satellites are short signal transit times, low transmitter power, and simple antennas. However, a large number of satellites is needed to ensure complete global coverage.

- Digitalaufnahmen im Studio oder Aussendienst
- Editing mit modernster Digital-Audio-Workstation
- Kopierservice für CD-Kleinauflagen
- Tonrestaurierung alter Schallplatten und Bänder



**CH-3457 WASEN (IM EMMENTAL)**  
FON +41 (034) 437 31 31 · FAX +41 (034) 437 31 30  
mail@lanzrecording.ch · www.lanzrecording.ch