

Institut für Kommunikation und Navigation

Festschrift zum
40-jährigen Jubiläum



Optische Freistrahldatenlinks

Höchste Datenraten für mobile Anwendungen

Dr. Dirk Giggenbach, Joachim Horwath



Abb. 1: Anwendungsszenarien der optischen Freiraumkommunikation.

In unserer mobilen Gesellschaft, in der die Menschen immer mehr Zeit in Verkehrsmitteln verbringen, wird die arbiträre, schnelle und mobile Kommunikation zu einer gesellschaftlichen Schlüsseltechnologie. Ebenso wird der Kommunikationsbedarf zwischen – teilweise ebenfalls mobilen – Maschinen (wie Autos, Züge, Roboter, Flugzeuge) weiter ansteigen.

Entsprechende Kommunikationsverfahren wie UMTS oder WLAN werden hierfür erfolgreich eingesetzt, bieten aber nur eine Lösung für die direkte Nutzeranbindung in unmittelbarer Nähe zur Basisstation. Entsprechend steigt aber auch in den übergeordneten mobilen Kommunikationsverbindungen der Datentransfer. Wenn zum Beispiel die Passagiere eines A380 in Zukunft mit individuellen hochratigen Internetverbindungen und Video-on-Demand versorgt werden sollen, steigt die Anforderung an die externe Datenkommunikation für das ganze Flugzeug schnell in den Bereich von mehreren hundert Megabit pro Sekunde. Noch höhere Datenraten ergeben sich für neue hoch auflösende Sensoren von Erdbeob-

achtungssatelliten. Die bisher für die Verbindung zwischen bzw. zu mobilen Kommunikationspartnern eingesetzten Funktechniken stoßen dabei an ihre Grenzen. Aufgrund des begrenzten Funkspektrums kann ein derart großer Bandbreitenbedarf nicht mehr bedient werden (s. Kasten 1).

Eine Lösung des Bandbreitenproblems besteht daher in der Nutzung des optischen Spektrums für die Freistrahlinformationsübertragung, das heißt Wellenlängen im nahen und mittleren Infrarot. Damit wird in bestimmten Anwendungsgebieten optische Freiraumkommunikation die Funktechnik ablösen. Datenraten im Gigabit-Bereich sind hierbei heute schon möglich. Die optische Technologie beruht auf modulierter Laserstrahlung, ähnlich wie sie in terrestrischen Glasfasernetzen verwendet wird. Da der Vorteil der optischen Freistrahlobübertragung allerdings unter anderem in der engen Bündelung des Lichtsignals liegt, muss der Lichtstrahl extrem präzise auf den Kommunikationspartner ausgerichtet werden, hierbei geht es um Tausendstel Grad. Die verwendeten Laserwellenlängen liegen dabei außerhalb des für das menschliche Auge sichtbaren Bereichs im Infrarot.

Von reinen Intersatelliten-Verbindungen hin zu atmosphärischen Hochgeschwindigkeitsnetzwerken

Ursprünglich wurde diese Technologie für die Intersatellitenkommunikation entwickelt. Hierbei kommt es besonders auf eine leistungseffiziente Übertragungstechnologie an, da Energie- und Masseverbrauch auf einem Satelliten minimal sein muss.

Zunehmend rücken aber auch Anwendungen in den Vordergrund bei denen man die Vorteile der optischen Übertragung auch in der Atmosphäre nutzen will. Neben der Leistungseffizienz sind hier die verfügbaren Kommunikationsbandbreiten interessant, da im klassischen Funkspektrum hochratige Über-

tragungstechniken schon am nicht verfügbaren Frequenzbereich scheitern. Da das Signal bei der optischen Übertragung extrem eng gebündelt bleibt und es damit nicht zu Interferenzstörungen zwischen verschiedenen Kommunikationssystemen kommt, bestehen hier keine regulatorischen Einschränkungen.



Abb. 2: Mögliche Abdeckung Europas durch ein HAP-Kommunikationsnetz.

Ein mögliches zukünftiges Szenario besteht in der optischen Vernetzung mehrerer so genannter High-Altitude-Plattformen (HAPs), welche in der Stratosphäre positioniert ein großes Gebiet mit Mobilfunkdiensten versorgen können (Abbildung 2).

Atmosphärische Effekte als Herausforderung für die Forschung

Eine Herausforderung für die Übertragung von gerichteten Lichtsignalen sind die zeit- und ortsabhängigen Einflüsse der Erdatmosphäre. Dabei unterscheidet man zwischen reinen Dämpfungseffekten und sog. Turbulenzeffekten (s. Kasten 2 auf der nächsten Seite).

Dichter Nebel und Bewölkung führen zu starker Dämpfung des Lichtsignals. Daher haben direkte Verbindungen aus dem Weltraum zu einer einzigen optischen Bodenstation in mitteleuropäischen Lagen nur eine begrenzte Verfügbarkeit. Daraus begründet sich der vorteilhafte Einsatz der optischen Richtfunktechnik zunächst für die Luftfahrt, da die mittlere Bewölkungswahrscheinlichkeit mit der Höhe stark abnimmt und über etwa 8 Kilometern Höhe in der Regel vernachlässigbar sind.

Vorteile der Optischen Freistrahldatenübertragung

Elektromagnetische Wellen – wie sie zu Kommunikationszwecken eingesetzt werden – neigen aufgrund unumgänglicher Naturgesetze unweigerlich zur Aufweitung (Divergenz), was zur Verringerung der Signalstärke beim Empfänger führt. Durch Richtantennen beim Sender (z.B. Parabolantennen, Teleskope) kann diese Divergenz minimiert werden, wobei der Divergenzwinkel umso kleiner ist, je größer die Antennenfläche und je kleiner die Wellenlänge des Signals ist. Daher kann durch Verringerung der Trägerwellenlänge die Signalstärke beim Empfänger erhöht werden. Da Kommunikationslaser elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen von etwa einem tausendstel Millimeter erzeugen sind sie die idealen Quellen für hocheffiziente gerichtete Freistrahldatenübertragung. Der Effizienzvorteil gegenüber den konventionellen Wellenlängen im Mikrowellenbereich liegt bei einem Faktor von über einer Million (Abbildung 3). Dieser Gewinn kann vorteilhaft in die verschiedenen Übertragungsparameter wie Sen-

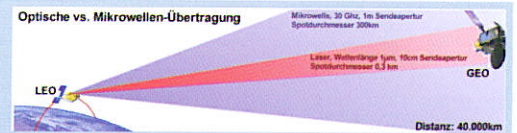


Abb. 3: Vorteile der optischen Freistrahldatenübertragung gegenüber der Mikrowellenkommunikation

deistung, Antennengrößen, Distanzen und Datenrate investiert werden. Insbesondere die Datenraten können mit optischen Technologien erheblich gesteigert werden, bis hin zu den in der terrestrischen Glasfaserkommunikation üblichen Bereich von vielen Gigabit pro Sekunde.

Im Wellenlängenbereich der klassischen Funktechnik (einige m bis cm Wellenlänge) stehen derartigen Datenraten zum einen technologische Probleme, zum anderen aber in noch viel erheblichem Maße das begrenzte Frequenzspektrum gegenüber – es sind schlichtweg alle verfügbaren Frequenzbänder bereits vergeben, so dass keine breiten Spektralbereiche für neue Datenverbindungen zur Verfügung gestellt werden können.

Um die Verfügbarkeit der Verbindungen zum Boden zu erhöhen, wird auf die sog. Bodenstationsdiversität zurückgegriffen. Mit mehreren optischen Bodenstationen an weit entfernten Standorten erzielt man hierbei eine hohe kombinierte Verfügbarkeit. Die eingesetzten optischen Empfangsteleskope sind relativ klein und haben wenige Dezimeter im Durchmesser. Diese können daher ohne großen Aufwand transportabel oder fernbedient betrieben werden.

Aktuelle Forschungsprojekte und Entwicklungen

Die Technologie der zukünftigen mobilen Breitbandkommunikation von stratosphärischen Plattformen wird in dem EU-Projekt CAPANINA untersucht. In Zukunft

Besonderheiten bei der Übertragung durch die Atmosphäre

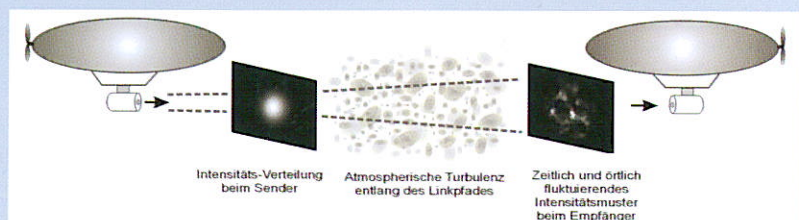
Bei der Anwendung innerhalb der Erdatmosphäre wird die optische Übertragungstechnik durch Wolken, atmosphärische Dämpfung und Brechungsindexturbulenz (BIT) beeinflusst. Bezüglich der BIT leidet der optische Richtfunk unter ähnlichen Problemen wie die optische Astronomie, nämlich unter der Zerstörung der Feldkohärenz durch das turbulente Ausbreitungsmedium, die Erdatmosphäre (Abbildung 4). Die Mikrowellentechnik wird hingegen durch diese meteorologischen Effekte sehr viel geringer beeinflusst. Es lässt sich allerdings durch geschickte Wahl der Laserwellenlängen die atmosphärische Dämpfung minimieren und der BIT kann durch Diversitäts- und Kodierungstechniken begegnet werden. Bei Anwendungsszenarien oberhalb gewisser Atmosphärenhöhen kann die Wolkendämpfung vernachlässigt werden (z.B. bei Inter-HAP-Links, Flugzeug-HAP-Links oder Flugzeug-Satellit-Links).

Was bedeutet Brechungsindexturbulenz?

Die freie Atmosphäre besteht aus unterschiedlich großen Luftzellen (wenige mm bis einige m Durchmesser) welche leicht unterschiedliche Temperatur und damit unterschiedlichen Brechungsindex haben. Für Licht ist daher die Atmosphäre kein ideal transmittierendes homogenes Medium sondern weist einen örtlich und zeitlich zufällig-turbulent verteilten Brechungsindex auf, man spricht von Brechungsindexturbulenz. Das Licht wird davon örtlich verteilt leicht abgelenkt, man sagt die Wellenfront des Lichts wird gestört. Im weiteren Ausbreitungsvorgang entstehen

dann unter anderem Intensitätsschwankungen. Dieser Effekt bedingt z.B. das Funkeln von Sternen und das „Flirren“ des Bildes über heißem Asphalt. Für die optische Kommunikation innerhalb der Atmosphäre und auch für die Beobachtende Astronomie ist dies ein erhebliches, wenn nicht das – abgesehen von der Bewölkung – dominanteste Problem. Da die Luftzellen örtlich und zeitlich (durch Wind) hochdynamisch sind, kommt es zu einer Modulation der Intensität und der Wellenfront beim Empfänger, was sich wiederum in schnellen Signalschwankungen (Fading) bemerkbar macht.

Abb. 4: Auswirkungen der Brechungsindexturbulenz.



sollen diese Plattformen mit Hilfe neuer Funktechniken Hochgeschwindigkeitsverbindungen zum mobilen Endbenutzer ermöglichen. Diese sind mit 120 Megabit pro Sekunde mindestens 20 Mal schneller als heutige – ortsgebundene – DSL-Verbindungen. Bei einigen hundert Anwendern die innerhalb des Abdeckungsbereichs einer Plattform diese Kommunikation nutzen, können nur optische Backbone-Links diese großen Datenmengen weiterleiten. Im Projekt „CAPANINA“ wurde bei einem Versuch mit einem Stratosphärenballon im August 2005 die optische Freiraumkommunikation bereits erfolgreich in der Stratosphäre getestet (Abbildung 5 und 6). 1,25 Gbit/s wurden vom Flugträger zur mobilen optischen

Bodenstation des Instituts übertragen. Außerdem wurde mit speziell entwickelten Messgeräten die Beeinflussung der atmosphärischen Effekte auf den optischen Kanal untersucht.

Auf Basis der in verschiedenen Trials gewonnenen Erkenntnisse werden neue Verfahren zur Umgehung der atmosphärischen Störung entwickelt und erprobt. Bereits erfolgreich wurden Diversitätsverfahren mit mehreren Sendern erprobt, die erheblich zur Verringerung der durch die Brechungsindexturbulenz hervorgerufenen Empfangsleistungseinbrüche, auch Fading genannt, führten. Ebenso werden am Institut spezielle Codierungsverfahren zur Fadingkanal entwickelt.

Weitere viel versprechende Ansätze bestehen im Einsatz größerer Wellenlängen zur Verringerung von Wolkendämpfung und Fading und in Mehrfachzugriffsverfahren, welche es einem Terminal ermöglichen sollen mit mehreren Kommunikationspartnern gleichzeitig Kontakt zu halten.

Aktuell wird im Projekt Kiodo (Kirari Optical Downlink to Oberpfaffenhofen) in einer Kooperation mit der japanischen Weltraumbehörde JAXA ein Datenlink von einem schnell und niedrig fliegenden Testsatelliten, der ein optisches Kommunikationsterminal mitführt (Kirari, 600 Kilometer Orbithöhe), zur optischen Bodenstation des Instituts in Oberpfaffenhofen (OGS-OP) getestet (Abbildung 7). Neben dem Datenempfang besteht die Hauptaufgabe im zuverlässigen Verfolgen des relativ schnell am Himmel vorüberziehenden Satelliten und in der parallelen Vermessung des atmosphärischen Übertragungskanal. Dieses Experiment verläuft äußerst erfolgreich: es gelingt bei einigermaßen klarem Wetter, eine zuverlässige Kommunikationsverbindung zum Satelliten aufzubauen und diese während der Überflugsdauer zu halten. Kiodo stellt daher einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Nutzung zukünftiger Fernerkundungssensoren mit hohen Datenvolumen dar. Es wird damit auch der Weg für optische Kommunikationsverbindungen zwischen Flugzeugen und Satelliten sowie zu zukünftigen stratosphärischen Kommunikationsplattformen geebnet.

Zukünftige Experimente

Noch im Jahr 2006 wird auf dem deutschen Radar-Erderkundungssatelliten TerraSAR-X zum ersten mal ein kohärentes Inter-Satellite-LCT (Laser Communica-

tions Terminal) im Erdorbit erprobt. Hierzu ist ein Downlink zu einer optischen Bodenstation und in einem weiteren Schritt ein Inter-Satellite-Link mit einem zweiten Satelliten geplant. Die Datenrate beträgt dabei 5,6Gbps. Weiterhin sind inneratmosphärische Tests mit Verbindungen von unbemannten Flugzeugen (UAVs – unmanned aerial vehicles) geplant, die z.B. zur Verkehrsüberwachung oder Grenzkontrolle eingesetzt werden können. Das Thema aeronautisch-optische Kommunikation wird in mehreren EU-Projekten (ATENAA, MINERVAA) weiterverfolgt.

Internationale Standardisierung

Eine weitere wichtige Aufgabe im zivilen Anwendungsbereich wird die internationale Standardisierung dieser Übertragungstechnologie sein. Da je nach Anwendungsgebiet und nationaler Forschungsvorgeschichte verschiedene Technologien (Wellenlängen, Modulationsverfahren, Codierungsverfahren) verfolgt werden, sind die wenigen zur Zeit weltweit entwickelten Laserterminals meist nicht zueinander kompatibel. Die stark unterschiedlichen Randbedingungen aufgrund der Vielfalt von Anwendungsszenarien hat zudem bisher einen allgemeingültigen optimalen Ansatz verhindert. Die erreichte Technologiereife würde nun eine Entwicklungsreihe von intelligenten, störungsadaptiven und abwärtskompatiblen optischen Kommunikationsterminals ermöglichen – ein Aufgabengebiet, auf dem sich das Institut in den nächsten Jahren verstärkt engagieren will.

Dr. Dirk Giggenbach leitet die Arbeitsgruppe Optische Freiraumkommunikation in der Abteilung Digitale Netze des Instituts für Kommunikation und Navigation. Joachim Horwath ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter für CAPANINA.

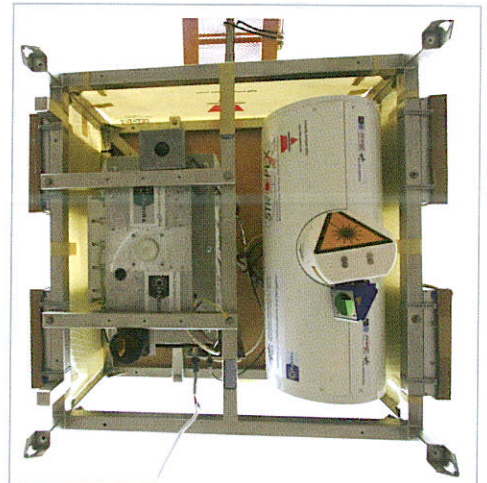


Abb. 5: Optisches Terminal montiert unter einem Stratosphärenballon im Projekt Capanina.



Abb. 6: Start des Atmosphärenballons in Kiruna, Schweden.



Abb. 7: Teleskop der optischen Bodenstation in Oberpfaffenhofen.