

VDE-WHITE PAPER



NEUE KOMMUNIKATIONS- SYSTEME FÜR DEN MOBILEN INTERNETZUGANG

Stratosphärische Kommunikationsplattformen
und LEO-Mega-Constellations

ITG

VDE

Autoren

Dr. Dirk Giggenbach, Institut für Kommunikation und Navigation,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen

Prof. Dr.-Ing. Andreas Kirstädter, Institut für Kommunikationsnetze
und Rechnersysteme, Universität Stuttgart

Christian Fuchs, Institut für Kommunikation und Navigation,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen

Dr. Jörg-Peter Elbers, ADVA Optical Networking, Martinsried

Prof. Hans-Joachim Grallert, HightecConsult, vormals Fraunhofer
Heinrich-Hertz-Institut Berlin

Empfohlene Zitierweise

*VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2016):
VDE-White Paper. Neue Kommunikationssysteme für den mobilen
Internetzugang. Stratosphärische Kommunikationsplattformen und
LEO-Mega-Constellations. Frankfurt am Main.*

Impressum

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG)

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main

Telefon 069 6308-362 · E-Mail itg@vde.com · <https://www.vde.com/itg>

Bildnachweise Titel ©: VDE e.V., iStock

Design: www.schaper-kommunikation.de

Neue Kommunikationssysteme für den mobilen Internetzugang

Stratosphärische Kommunikationsplattformen und LEO¹-Mega-Constellations

**Ein Technical White Paper der
Informationstechnischen Gesellschaft im VDE (ITG)
Fachausschuss 5.3 „Optische Nachrichtentechnik“
Version: 20170102**

Die ITG engagiert sich mit 10.000 Mitgliedern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik sowie 1.300 ehrenamtlichen Mitarbeitern für die Förderung der Informationstechnik, ihrer Anwendungen und für den technisch-wissenschaftlichen Nachwuchs. Der VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik ist mit 36.000 Mitgliedern, davon 1.300 Unternehmen, einer der großen technisch-wissenschaftlichen Verbände Europas.

¹ LEO: Low Earth Orbit Satellite

1. Kurzfassung

Die Nutzung stratosphärischer Plattformen (High-Altitude Platforms, HAPs) oder niedrig fliegender Satelliten (Low Earth Orbit Satellites Mega-Constellations, LEO-MC) kann die klassische terrestrische (leitungsgebundene oder mobilfunkbasierte) Internetanbindung durch neue drahtlose Kommunikationsmöglichkeiten erweitern. „Fliegende Basisstationen“ können schnell aufgebaut und im Fall der HAPs auch flexibel umpositioniert werden. Netzbetreibern bietet sich hier das Potential für eine erhebliche Kosten- und Zeitersparnis bei der Versorgung der noch nicht an das Internet angeschlossenen Hälfte der Erdbevölkerung. Ohne diese neue Technologieansätze kann sich der flächendeckende klassische Breitbandausbau in großen Erdregionen (Afrika, Brasilien, Indien, Zentralasien) verlangsamen, wenn er nicht gar zum Erliegen kommt. In Gebieten mit hoher Breitbandverfügbarkeit wie in Europa ist ein ergänzender (z.B. zur Erhöhung der Netzkapazität bei Großveranstaltungen) oder substituierender Einsatz der neuen Technologien (z.B. zum Aufbau einer Behelfsinfrastruktur im Katastrophenfall) interessant.

Raumfahrtunternehmen und global agierende Internetkonzerne planen zwei neue Klassen von drahtlosen Breitbandzugangszustellen. Die Vernetzung der Satelliten bzw. Höhenplattformen wird dabei durch optische Freistrahlkommunikation (Free-Space Optics, FSO) erfolgen, welche keine lizenzierten Frequenzbereiche erfordert und mit deutlich höheren Datenraten als mobile Richtfunkssysteme arbeitet.

Diese neuen, nahezu autarken Mobilfunksysteme können zu einer Monopolstellung ihrer Betreiber führen und Netzneutralität und Datenhoheit einschränken. Politik und Industrie sind aufgefordert, Strategien zu entwickeln, um den resultierenden Marktveränderungen proaktiv zu begegnen. Eine Intensivierung der Forschung ist notwendig, um die europäische Position in diesem neuen Technologiefeld auszubauen. Umfangreiche Vorarbeiten und exzellente Forschung in den Bereichen Optische Kommunikation, Satelliten-, sowie Luft- und Raumfahrttechnik sowie Kleinserienfertigung dieser optischen Übertragungstechnik prädestinieren Deutschland für eine führende Rolle.

2. Alternative Technologien für die Zugangsnetze

Die Nutzeranbindung an Datendienste (Telefonie, Internet, TV) geschieht derzeit hauptsächlich über kabelgebundene Haushaltsanschlüsse, terrestrische Mobilfunknetze oder lokale WLAN-Hotspots. Alternativen bestehen seit längerem in individuellen konventionellen Satellitendiensten, wie Iridium oder Inmarsat. Diese sind jedoch äußerst kostenintensiv und bieten meist nur eine geringe Datenrate, daher haben sie sich für den Massenmarkt nicht durchgesetzt. Als weitere Satellitentechnologie werden derzeit geostationäre Very-High-Throughput-Satellitensysteme (GEO-VHTS) entwickelt. In Erweiterung zu klassischen TV-Satelliten werden diese dem Nutzer auch einen schnellen Rückkanal und dadurch eine komplette hochbitratige interaktive Anbindung ermöglichen. Durch nur einen Satelliten kann damit ein großes Gebiet auf der Erde abgedeckt werden. Allerdings erschweren längere Signallaufzeiten Sprachkommunikation und Echtzeitanwendungen. Für einen gewissen Marktanteil sind VHTS eine viel versprechende zukünftige Zugangstechnologie [VHTS, ITG-SatCom]. Ein erstes derartiges Projekt namens O3B („Other Three Billions“, [O3B]) wird derzeit realisiert. Es besteht aus einem Kommunikationssatelliten-Ring um den Äquator, über den Mobilfunk-Basisstationen und lokale Internetanbieter angebunden werden.

Für den Massenmarkt werden aber weitere Technologien verfolgt, welche eine globale und direkte Anbindung von Nutzern ermöglichen sollen:

High Altitude Plattformen (HAPs) sind im Wesentlichen fliegende lokale Mobilfunkbasisstationen, welche in der Stratosphäre platziert werden und ein Gebiet mit mehreren tausend Quadratkilometern mit Mobilfunkdiensten versorgen können.

Unter anderem planen seit Kurzem die Internetkonzerne Google und Facebook, die über keine terrestrische Nutzerinfrastruktur verfügen, so ihren Nutzerkreis auszubauen, wobei die neuen Kunden hauptsächlich in bisher unterversorgten, aber bevölkerungsreichen Gegenden zu finden sind (z.B. in Südamerika, Indien, Afrika, Indonesien).

LEO-Mega-Constellations (LEO-MC) sind Satellitensysteme mit sehr vielen kostengünstigen Satelliten in niedrigen Erdborbits, welche eine Abdeckung der gesamten Erdoberfläche ermöglichen. Nutzer werden mittels Richtantennen vom Boden an einzelne Satelliten angebunden, welche untereinander mit Inter-Satelliten-Links vernetzt sind.

Um eine nahtlose Abdeckung zu erreichen, ist eine große Anzahl an Satelliten erforderlich. Erste Systeme, wie die OneWeb-Satellitenkonstellation, sollen beispielsweise auf 648 Satelliten basieren. Dies bringt auch für die Steuerung der Satelliten, den Betrieb des Systems und für die Vermeidung von Weltraumschrott eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Zudem müssen die einzelnen Satelliten sehr klein und kostengünstig sein, um einen wirtschaftlichen Aufbau und Betrieb des Systems zu ermöglichen.



FSO-Links (Freistrahloptische Datenlinks) zur Vernetzung von HAPs und Satelliten

(Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Für die Verbindung vom Satellit zum Nutzer ist in jedem Fall die Verwendung von Funktechnologie angedacht. Obwohl das OneWeb-System, dessen erste Satelliten bereits im Jahr 2017 gestartet werden sollen, auch für die Inter-Satelliten-Links noch auf traditionelle Funktechnologie setzt, ist abzusehen, dass diese zukünftig durch optische Inter-Satelliten-Links mit höheren Datenraten abgelöst werden. Die Anbindung der Nutzer würde weiter mit Funktechnologie erfolgen, so dass keine Probleme aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit optischer Links in der Atmosphäre im Falle von Bewölkung entstehen.

3. Beschreibung der Technik

a. High Altitude Platforms:

Seit längerem werden aerostatische und aerodynamische Plattformtechnologien entwickelt.

Aerostatische Plattformen (wie z.B. Gasballons) können ohne Antrieb in stratosphärischen Höhen verbleiben. Durch gezielte Höhenänderung können sie auch in ihrer Position begrenzt beeinflusst werden. Zeppelinartige Plattformen können ggf. mit solargespeistem elektrischem Antrieb stationär an einem Ort gehalten werden. Die mit Internet-Zugang abdeckbare Fläche steigt quadratisch mit der Flughöhe an, wobei in der Praxis natürlich die mit der Höhe abnehmenden Empfangssignalstärken zu berücksichtigen sind. Typische Flughöhen sind 20 km [LOON].

Aerodynamische Plattformen sind unbemannte stratosphärische Flugzeuge, welche ebenfalls mit – in Batterien zwischengespeicherter – Solarenergie versorgt werden. Der bekannteste Vertreter ist die Aquila-Drohne von Facebook [FB-connectivity], welche etwa 400 kg wiegen und in 18 bis 28 km Höhe operieren soll.

Bereits 2003-2006 wurde im EU-FP6-Projekt „CAPANINA“ [CAP] diese Technologie für Kommunikationsnetze erforscht. Ohne bewilligtes Folgeprojekt allerdings wurden diese Entwicklungen in Europa nach 2006 nicht mehr in ausreichendem Umfang weiterverfolgt.



Experimentelles optisches Kommunikationsterminal für die Stratosphäre, geflogen im Projekt CAPANINA 2005

(Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) © Markus Steur

Spätestens 2011 hat *Google* (jetzt *Alphabet*) mit dem Entwicklungsprojekt *Loon* begonnen, welches über viele in der Stratosphäre verteilte freifliegende Heliumballons ein auf LTE basierendes Mobilfunknetz aufbauen soll. Die geringe Distanz zwischen HAP und den Nutzern erlaubt eine direkte Anbindung über LTE an mobile Standard-Endgeräte. Tests des Loon-Systems wurden bisher in den USA, Neuseeland, Nepal, Sri Lanka und weiteren Staaten unternommen.

Die Vernetzung der einzelnen Plattformen untereinander sowie die Anbindung an das globale Internet über Satelliten oder direkte HAP-zu-Boden-Links wird voraussichtlich über optische Freistrah-Link-Terminals (FSO) erfolgen [PM-FB-FSO], [PM-Loon-FSO]. Diese bieten mit Wellenmultiplex und extremer Antennen-Richtcharakteristik die erforderlichen hohen Datenraten von deutlich mehr als 10 Gbit/s pro Link.

Optischer Freistrahkanal zwischen den HAPs untereinander und zum Boden

Der auf optischer Freiraumübertragung basierende Kommunikationskanal zwischen den HAPs in stratosphärischer Höhe bietet zum einen äußerst geringe Dämpfungswerte (oberhalb von sonst blockenden Wolken und Aerosoleintragung). Zudem ist die Atmosphäre frei von der in der Faseroptik störenden Dispersion. Störend dagegen macht sich der leicht variierende Brechungsindex bemerkbar, welcher zu Szintillation des optischen Feldes führt, sich also durch schnelle Schwankungen der Empfangsleistung beim Partnerterminal bemerkbar macht. Die Stärke dieses Effektes ist dabei von Distanz und Flughöhe der HAPs abhängig. Durch entsprechende Maßnahmen (FEC und ARQ) kann dies beherrscht werden [HAP-ChanMod]. Diese optischen Freistrah-Links können Hunderte von Kilometern zwischen den HAPs überbrücken und verwenden unter Anderem Komponenten aus der konventionellen Glasfaserkommunikation bei einer Wellenlänge von ca. 1550 nm. Ihr Einsatz ist ebenso für die hochratige Kommunikation zwischen HAPs und Bodenstationen geplant.

Vernetzung

Ein wichtiger Aspekt beim Einsatz von HAPs ist ihre Vernetzung untereinander, sowie mit den Teilnehmern. Grundsätzlich ist zu klären, wie viele Teilnehmer mit welcher Funktechnologie (z.B. LTE zur Sicherstellung der Endgerätekompatibilität) pro HAP in ausreichender Qualität versorgt werden können. Insbesondere zur Abdeckung ganzer (Sub-)Kontinente sind größere Topologien zu betrachten. Die dazu notwendige Multi-Hop-Übertragung zwischen den HAPs muss hinsichtlich der erzielbaren Dienstgüte (Verzögerungszeiten und Bandbreiten) optimiert werden. Bedingt durch die zeitlich schwankende Übertragungsqualität zwischen den HAPs und von den HAPs zum Boden rücken zusätzlich Verfügbarkeitsaspekte in den Fokus. Alle aufgeführten Untersuchungsaspekte sind vor dem Hintergrund der begrenzten Energieversorgung/Flugzeit der HAPs zu betrachten.

Nutzeranbindung, Mobilitätsverwaltung und Systemkapazität bei HAPs

Die Anbindung der Nutzer sollte aus Akzeptanzgründen nach Möglichkeit auf der Basis weit verbreiteter LTE- (bzw. künftig 5G-) Mobilfunktechnologien erfolgen. Auch muss hierbei die Nutzermobilität geeignet

abgebildet und der Zugriff auf die gemeinsam genutzten Funkressourcen gesteuert werden. Die dazu benötigten Rechenleistungen sind, zusammen mit der Basisbandsignalverarbeitung, geeignet zu platzieren. Cloud-Rechenzentren am Boden sind entsprechend anzubinden und in den Datenfluss zu integrieren. Die Betrachtung des Gesamtnetzes mit Nutzerkapazität und Dienstgüte und seine Anbindung an die bisherige terrestrische Infrastruktur bleiben zusätzlich wichtige Punkte.

b. LEO-Mega-Constellations:

Ein ähnlicher Ansatz wie bei den HAPs wird mit den LEO-Mega-Constellations verfolgt: Angestrebt sind kurze Distanzen zum Nutzer durch relativ niedrige Orbits, um so ein günstiges Link-Budget und geringe Verzögerungen erreichen zu können. Allerdings benötigen diese Konstellationen bisher noch eigene Terminals für die Nutzeranbindung am Boden und eine direkte Anbindung von Smartphones, z.B. über LTE, ist nicht möglich. Es ist allerdings zu erwarten, dass mit der Einführung der 5G-Mobilfunktechnologie die Einbindung von Satelliten in das mobile Netz erheblich vereinfacht wird.

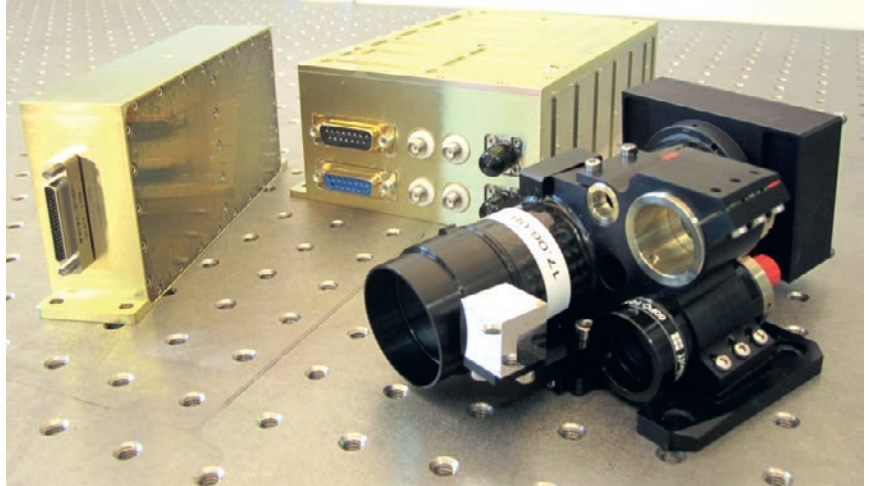
Aktive Firmen im Bereich der LEO-Mega-Constellations sind u.a.:

- OneWeb, gegründet von Greg Wyler, unterstützt u.a. von Airbus und Richard Branson (Virgin Group) [OW]. Es sind derzeit 700 LEO Satelliten geplant.
- SpaceX, gegründet von Elon Musk, unterstützt von Google. 4000 miteinander verlinkte Satelliten sind geplant. Jedoch ist laut eigener Aussagen von SpaceX das Projekt unsicher bzw. hat nicht die höchste Priorität. Allerdings hat SpaceX eigene wiederverwendbare Launcher und somit evtl. einen Kostenvorteil gegenüber OneWeb [SPX].
- Samsung. Die Firma hat im Jahr 2015 eine Megakonstellation mit bis zu 4600 Satelliten vorgeschlagen. [Samsung]

Obwohl die Vernetzung der Satelliten bei der ersten Generation des OneWeb-Systems noch per traditionellen Funklinks erfolgt, ist abzusehen, dass zukünftige Systeme aufgrund steigender Durchsatzanforderungen optisch vernetzt werden müssen. Dies stellt ein ideales Szenario für optische Datenlinks dar, da keine störende Atmosphäre vorhanden ist. Die Distanzen zwischen den Kommunikationspartnern sind aufgrund der hohen Anzahl an Satelliten moderat, was hohe Datenraten ermöglicht. Ein Beispiel für optische Kommunikationssysteme auf kleinen Satelliten ist OSIRIS (Optical Space Infrared Downlink System) des DLR. Dieses wurde am 22.6.2016 an Bord des Kleinsatelliten BIROS gestartet und kann mit einer Masse von 1,64 kg und einem Leistungsverbrauch von wenigen 10 W bereits eine Datenrate von 1 Gbit/s zwischen einem Satelliten und einer Bodenstation erreichen.

Um Datenverbindungen mit hoher Kapazität mittels der LEO-Mega-Constellations zu ermöglichen, sind weit höhere Datenraten möglich.

10 Gbit/s können mit moderatem Aufwand über eine Distanz von 1000 km bis hin zu einigen 1000 km erreicht werden. Höhere Datenraten, wie beispielsweise 40 Gbit/s oder 100 Gbit/s sind natürlich wesentlich herausfordernder, aber technisch immer noch machbar.



Kostengünstiges, leichtes, leistungsfähiges optisches Freistrahldatenübertragungssystem OSIRIS

(Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

Nutzeranbindung, Mobilitätsverwaltung und Systemkapazität bei LEO-MCs

Hier gelten die entsprechenden Fragestellungen wie oben bei den HAPs aufgeführt.

c. Vergleichsmatrix – Vorteile/Nachteile

Die folgende Tabelle bewertet die wichtigsten wirtschaftlichen und technologischen Aspekte der genannten Ansätze bezüglich Kosten bzw. Qualität im Vergleich zur „klassischen“ terrestrischen (kabelgebundenen bzw. drahtlosen) Teilnehmerversorgung. Die Einsetzbarkeit neuer terrestrischer Kabelinfrastruktur in bisher nicht gut versorgten Gebieten („neue Regionen“) gestaltet sich meist schwierig aufgrund örtlicher rechtlicher und politischer Unwägbarkeiten.

	Kabelgeb. Zugang *)	Terrestrischer Mobilfunk	GEO-VHTS	HAPs	LEO-MCs
Investitionsbedarf	--	--	-	++	o
Einsetzbarkeit in „neuen Regionen“	--	+	++	++	++
Betriebskosten	o	o	+	o	o
Endgerätekompabilität	++	++	-	++	-
Übertragungsverzögerung	++	+	--	+	+
Datenraten (Sicht der Endnutzer)	++	+	+	+	+
Technologiereife	++	++	+	--	o

*) inkl. WLAN

4. Weltweiter sozioökonomischer Einfluss

Aufgrund des starken globalen Bevölkerungswachstums gehen Experten in den nächsten Jahren von einer relativen Verringerung des Online-Anteils in Entwicklungsländern aus [TURN]. Da ein direkter Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und der Verbreitung von Onlinezugängen gesehen wird, befürchtet man daher teilweise eine Verschlechterung der Situation in unterentwickelten Ländern [BROAD]. Für Handels-, Dienstleistungs- und Medienunternehmen mit starkem Internet-Bezug bedeutet diese Entwicklung eine Verlangsamung oder sogar Sättigung ihrer Wachstumsmöglichkeiten. Mit den neuen Zugangstechnologien HAPs und LEO-MC kann diesem Problem in Entwicklungs- und Schwellenländern entgegengewirkt werden. Gleichzeitig lassen sich so auch in Industrieländern die letzten Versorgungslücken schließen.

Als problematisch – insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Netzneutralität – dürfte sich hierbei die Monopolstellung weniger Konzerne herausstellen. Über ihre diesbezügliche Strategie halten sich die oben genannten Unternehmen bedeckt.

Für den Kleinsatellitenmarkt geht man für den Zeitraum 2015 – 2019 von einem Marktvolumen vom 7,4 Mrd. US\$ aus – noch ohne Berücksichtigung der LEO-MCs [SPACOMM]. Die Raumfahrtindustrie in Deutschland und Europa ist in einer guten Position, um die notwendigen, kostengünstigen Kleinsatelliten zu entwickeln und zu produzieren. Airbus DS ist beispielsweise für den Bau der Satelliten für die OneWeb-Satellitenkonstellation verantwortlich [OW, AOW].

Für den Markt der HAPs fehlen bisher entsprechende Zahlen, was auch der guten Skalierbarkeit der HAP-Technologie geschuldet sein mag, die im Vergleich zu LEO-MCs ohne große Anfangsinvestitionen auskommt, weshalb man hier auch noch nicht mit Zahlen arbeiten muss, um Investoren einzuwerben.

5. Zusammenfassung

Weltweit gibt es aktuell ein großes Interesse an HAPs und LEO-MCs für

- 1) die schnelle und wirtschaftliche Bereitstellung von Internetzugang in großen, unterversorgten Gebieten
- 2) die Abfederung von temporären Spitzenlasten im existierenden Netz
- 3) den schnellen Aufbau einer Notinfrastruktur im Krisen- oder Katastrophenfall

Zukünftig müssen in solchen Systemen optische Freistrahlkommunikation und smarte Netzkonzepte verwendet werden, um einen hohen Datendurchsatz bei einer gleichzeitigen guten Flächenabdeckung erreichen zu können. Raumfahrtunternehmen und global agierende Internetkonzerne sind bereits aktiv in die Erforschung und Entwicklung solcher Systeme eingestiegen. Politik und Industrie sind aufgefordert, Strategien zu entwickeln, um den resultierenden Marktveränderungen proaktiv zu begegnen. Eine Intensivierung der Forschung (u.a. in den Bereichen der Übertragungstechnik, Vernetzung und der Subsysteme inklusive der Trägerplattformen) ist notwendig, um die europäische Position in diesem neuen Technologiefeld auszubauen. Umfangreiche Vorarbeiten und exzellente Forschung in den Bereichen Optische Kommunikation-, Satelliten- sowie Luft- und Raumfahrttechnik prädestinieren Deutschland für eine führende Rolle.

6. Referenzen

- [AOW] „Airbus Defence and Space Selected to Partner in Production of OneWeb Satellite Constellation“, Pressemeldung, 15. Juni 2015, <https://airbusdefenceandspace.com/newsroom/news-and-features/airbus-defence-and-space-selected-to-partner-in-production-of-oneweb-satellite-constellation/>, abgerufen 20170102
- [BROAD] Broadband Commission, <http://www.broadbandcommission.org/Documents/reports/bb-annualreport2015.pdf>, abgerufen 20160718
- [CAP] EU-FP6-Projekt „CAPANINA“ <http://www.capanina.org/>, abgerufen 20160718
- [ELHASPA] DLR UAV Plattform Entwicklungen http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabid-7660/13033_read-32825/, abgerufen 20160718
- [FB-connectivity] Facebooks weltweite Connectivity-Initiative <https://info.internet.org/en/story/connectivity-lab/>, abgerufen 20160718
- [HAP-ChanMod] Parthasarathy, Giggenbach, Kirstädter, “Channel Modelling for Free-Space Optical Inter-HAP Links Using Adaptive ARQ Transmission“, SPIE Security and Defence 2014, 22-25 Sep 2014, Amsterdam
- [ITG-SatCom] ITG-Weißbuch „DIE ZUKUNFT DER SATELLITEN-KOMMUNIKATION“, Informationstechnische Gesellschaft im VDE, Frankfurt, April 2016
- [LOON] Google’s Loon Projekt, <http://www.google.com/loon/how/>, abgerufen 20160718
- [OW] OneWeb https://en.wikipedia.org/wiki/OneWeb_satellite_constellation, abgerufen 20160718
- [O3B] The Other 3 Billions, <http://www.o3bnetworks.com/>, abgerufen 20160719
- [PM-FB-FSO] Spectrum-IEEE Meldung zu FSO bei Facebook, <http://spectrum.ieee.org/view-from-the-valley/robotics/drones/facebooks-aquila-drone-creates-a-lasernet-in-the-sky>, abgerufen 20160718
- [PM-Loon-FSO] Wired-Magazin zu FSO bei Loon, <http://www.wired.com/2016/02/google-shot-laser-60-miles-just-send-copy-real-genius/>, abgerufen 20160718
- [Samsung] Samsung proposes constellation of satellites to offer cheap, global Internet access, <http://www.itproportal.com/2015/08/13/samsung-satellite-constellation/>, abgerufen 20160720
- [SPACOMM] J. S. Perez Cano, Challenges and Opportunities with Small Satellites, Vortrag auf NEXCOMM/SPACOMM 2015, 20. April 2015, Barcelona, Spain
- [SPX] SpaceX satellite development facility, https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_satellite_development_facility
- [TURN] CNN “Broadband as a Foundation for Sustainable Development“, <http://i2.cdn.turner.com/cnn/2015/images/10/29/bb-annualreport2015-highlights.pdf>, abgerufen 20160718
- [VHTS] D. Giggenbach, E. Lutz, J. Poliak, R. Mata-Calvo, C. Fuchs, “A High-Throughput Satellite System for Serving whole Europe with Fast Internet Service, Employing Optical Feeder Links“, ITG-Fachtagung “Breitbandversorgung in Deutschland“, 20/21 April 2015, Berlin, verfügbar via ieeexplore.ieee.org



VDE

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
Telefon: 069 6308-0
E-Mail: service@vde.com
Internet: <http://www.vde.com>