



NeSC – NewSpace Communications

by VDE ITG

Empfohlene Zitierweise

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
Informationstechnische Gesellschaft im VDE (VDE ITG):
VDE Positionspapier
NeSC – NewSpace Communications

Autoren:

Dr. Dirk Giggenbach, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Knopp, Universität der Bundeswehr München, Forschungszentrum SPACE
Dr. Werner Mohr, Lehrbeauftragter Technische Universität Berlin
Dr. Marcus Thomas Knopp, DLR, Responsive Space Cluster Competence Center (RSC³)
Sigurd Schuster, Management Consulting
Dr. Sandra Hoppe, Nokia

Herausgeber

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik
Informationstechnik e.V.
Informationstechnische Gesellschaft im VDE (VDE ITG)
Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-360
itg@vde.com
<https://www.vde.com/itg>

Titelseite: © sdecoret/stock.adobe.com

Design: Schaper Kommunikation, Bad Nauheim

Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	4
2. Einführung und Motivation	5
2.1 Bedeutung von NewSpace	5
2.2 NewSpace Communication Systems (NeSC)	6
3. Eigenschaften von NeSC-Systemen	8
3.1 Entwicklung der Kommunikationsarchitekturen	8
3.2 Technische Eigenschaften der NeSC-Architekturen	10
3.3 Eigenschaften der verschiedenen NeSC-Arten	15
4. Aktuelle Systeme	16
4.1 Mega-Constellations	16
4.2 GEO-VHTS und MEO-Systeme	18
4.3 High-Altitude-Platform Systeme	19
5. Herausforderungen und Chancen durch NewSpace-Communications	20
5.1 Motivationen der Player und wirtschaftliche Bedeutung	20
5.2 Herausforderungen beim Betrieb des Space- bzw Stratosphären-Segments	21
5.3 Herausforderungen bei den Endnutzerdiensten	21
5.4 Nicht-terrestrische Netze in 5G und zukünftigen Mobilfunkgenerationen	22
5.5 Koexistenz und regulatorische Koordination mit bestehender Infrastruktur	23
5.6 Steigendes Kollisionsrisiko	24
6. Handlungsempfehlungen für Forschung, Entwicklung, und Realisierung	25
Abkürzungen	28

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des derzeit stark wachsenden kommerziellen *NewSpace*-Sektors werden neue Kommunikationssysteme entwickelt – sogenannte „Non-Terrestrial Networks“ (NTN), welche zunehmend auf *NewSpace Communications* (NeSC)-Systemansätzen basieren. Diese sollen die existierenden terrestrischen Mobilfunk- und leitungsgebundenen Netze zur Sprach-, Video- und Datenkommunikation ergänzen, und damit globale Verfügbarkeit und Omnipräsenz ermöglichen. Die Kombination aus terrestrischen und satellitengestützten Systemen wird die Zuverlässigkeit und räumliche Verfügbarkeit von Kommunikationssystemen insgesamt maßgeblich erhöhen.

Als satellitengestützte Kommunikationsplattformen werden hierzu in erster Linie Satelliten-Mega-Constellations (MC) im niedrigen Erdorbit (LEO) entwickelt. Aber auch weiterentwickelte geostationäre Systeme (sog. Very High Throughput Satellites, VHTS) und stratosphärische Träger (High Altitude Platform Systems – HAPS) dienen als Kommunikationsknoten. Eine Vernetzung von Systemen in verschiedenen Orbits bzw. Flughöhen bietet dabei weitere Vorteile, wie z.B. die Kombination von hoher Abdeckung und Sichtbarkeit mit günstigen Linkdistanzen und Frequenzwiederverwendbarkeit. Satellitensysteme können auch mit terrestrischen Kommunikationsnetzen integriert werden.

Die Versorgung großer und unterversorgter Gebiete mit Satellitenkommunikation bietet technische und finanzielle Vorteile. Dagegen ist es technisch nicht möglich, die Bevölkerung bzw. Nutzer eines Ballungsgebiets mit Hochgeschwindigkeits-Datendiensten ausschließlich mit LEO-MC basierten Systemen zu versorgen.

Die fortschreitende Erweiterung der Nutzung von öffentlichen Kommunikationsnetzen einschließlich NTN-Systemen durch die Digitalisierung von Gesellschaft, Staat und Wirtschaft, von persönlich-kommerziellen auf sicherheitsrelevante Bedarfe für Infrastruktur und Versorgung (wie Energie, Wasser, Bahn, PKW, Gütertransport, Flugverkehr oder behördliche Kommunikation) ist zwingend und uneingeschränkt resilient zu gestalten. Hier bieten weltraumgestützte Netze den großen Vorteil eines weiteren parallelen Kommunikationswegs, um absichtlichen Manipulationen und Störungen auszuweichen. Allerdings ergibt sich in Zusammenhang mit LEO-basierten Satellitennetzen das Risiko, dass es durch die stark zunehmende Anzahl mit Tausenden von kostengünstigen LEO-MC-Satelliten in den knappen Erdumlaufbahnen zu Kollisionen kommt und funktionsuntüchtige Satelliten nicht gezielt aus dem Orbit entfernt werden. Dies kann die institutionelle (Erdbeobachtung, wissenschaftliche Erprobung, Sicherheit) wie auch die astronautische Raumfahrt gefährden.

Eine Abhängigkeit Deutschlands und Europas von nicht-europäischen weltraumgestützten und im Wesentlichen kommerziellen Diensten und Systemen sollte bei NeSC vermieden werden, da sie zu den kritischen Infrastrukturen zählen. Die ausschließliche Nutzung und ggf. gar Förderung der technischen und weltraumrechtlichen Entwicklungen aus dem asiatischen und amerikanischen Raum darf für Deutschland und für die EU keine Option sein. Somit benötigt Europa zur Verbesserung der technologischen Souveränität eine eigene weltraum- und stratosphärengestützte Infrastruktur für Anwendungen wie die Ergänzung terrestrischer öffentlicher und privater Kommunikationsinfrastruktur, Anwendungen des globalen Internet-of-Things (IoT), Grenzüberwachung und Sicherung globaler Aufklärungskapazitäten. Die Erfahrungen der ersten Generation von LEO-MCs wie die Wahl ungünstiger Orbits bezüglich der Kollisionsrisiken trotz wirtschaftlicher Vorteile müssen dabei berücksichtigt werden. Mithin kann der zeitverzögerte deutsche und europäische Einstieg in diesem Sinne Vorteile bieten.

Wir zeigen in diesem Positionspapier die Eigenschaften und technischen Randbedingungen von NeSC-Systemen auf, beschreiben aktuelle Systemlösungen und Marktteilnehmer, Chancen und Herausforderungen der NeSC-Konzepte und geben abschließend Handlungsempfehlungen für Forschung, Entwicklung und Realisierung von NeSC-Systemen.

2. Einführung und Motivation

2.1 Bedeutung von NewSpace

Der Begriff *NewSpace*^{1 2} steht für einen neuen Ansatz zur Entwicklung von kostengünstigen Raumfahrttechnologien auf industrieller Basis und wird oft von kommerziell-privater Seite finanziert. Anvisierte Szenarien sind vor allem satellitenbasierte Kommunikation, Navigation, und Erderkundung, aber auch u.a. Weltraumtourismus, Asteroidenbergbau, interplanetare Raumfahrt. Das Hauptziel des *NewSpace*-Ansatzes ist es, kürzere Return-of-Investment-Zyklen und niedrigere Entwicklungs- und Fertigungskosten zu erreichen, indem der technische Aufwand reduziert wird (z.B. Wiederverwendung von Raketenstufen) und so weit wie möglich handelsübliche Komponenten verwendet werden. In erster Linie werden die Startkosten von Satellitennutzlasten um Größenordnungen reduziert³. Dies hat in den letzten 20 Jahren zu einer größeren Verbreitung der Raumfahrttechnologie geführt, die vor allem von den großen „Web-scalers“ bereitgestellt und oft von Start-ups und Hochschulen (insbesondere Universitätsprogrammen) unterstützt wurde. Hochqualifizierte Arbeitskräfte wurden dabei aus der etablierten Raumfahrtindustrie und staatlichen Einrichtungen abgeworben, und konventionelle staatliche und industrielle Institutionen wurden von diesen Playern überholt. Der finanziell eingeschränkte staatliche Sektor betrachtet die von *NewSpace* besetzten Gebiete zunehmend als komplementär und konzentriert sich daher mehr auf wissenschaftliche und fernere Ziele.

Die umfassendere Standardisierung und hohe Güte der Qualitätsstandards auf dem terrestrischen Kommunikationsmarkt haben das Niveau von Technologien und COTS-Komponenten (Commercial Off-The-Shelf) auf eine Ebene gehoben, welche sie auch für die Raumfahrtindustrie nutzbar werden lässt und einen Großteil des früher erforderlichen Aufwands und der Kosten für Raumfahrtqualifizierung stark reduziert. Massenproduktion von Satelliten am Fließband mit entsprechender Kostenreduktion, wiederverwendbare Raketenstufen, Miniaturisierung mit entsprechender Kostenreduktion (Nanosats und CubeSats), wie auch das „Lernen durch Fehler“ und „Masse statt Klasse“ anstatt extremer Qualitätssicherung und Einzelstücke, sind nun eine ernstzunehmende und disruptive Option, die es so bisher in der Raumfahrt nicht gab. In erster Linie werden dadurch die Satelliten-Startkosten derzeit schon um einen Faktor von etwa zehn (2 T\$/kg statt bisher 20 T\$/kg) stark gesenkt. Kommerzielle Ziele sind Satellitenkommunikationsnetze mit einer sehr hohen Anzahl von Satelliten (LEO-MCs – Low Earth Orbit Mega-Constellations), touristische Raumfahrt, Asteroidenbergbau, oder „High Altitude Platforms“ (HAPS) – also insbesondere die Option hochfliegender Mobilfunk-Basisstationen mit großer Reichweite aufgrund geringer Abschattung. Da die Stratosphäre eine Umgebung ähnlich dem Weltraum bietet, aber die Inbetriebnahme von HAPS nur einen Bruchteil der Kosten von Satellitentechnologie verursacht, können hier enorme Technologiefortschritte, wie z. B. bei HALE-Drohnen als Trägerplattform (High Altitude Long Endurance), geschaffen werden.

Der Erfolg von *NewSpace*-Konzepten ist derzeit am deutlichsten anhand des *Starlink* Satelliten-Kommunikationssystems des Unternehmens *SpaceX* zu sehen, welches das *NewSpace*-Konzept von Anfang an verkörpert hat. Durch die Kombination von Fließbandproduktion und Amortisation der Kosten für die Trägerrakete durch Wiederverwendbarkeit wird der Zugang zum Weltraum kostengünstiger. Andere bekannte Unternehmen sind Amazon-Kuiper, AST Space Mobile, Planet Labs, OneWeb, KLEO Connect, Kepler-Aerospace, Telesat-Lightspeed, Virgin Galactic, Deep Space Industries, ISAR-Aerospace, Rocket Labs, i-Space, E-SPACE, Reflex Aerospace, Mynaric, und viele weitere (Stand 2023)⁴.

1 Wikipedia zu *NewSpace*: https://en.wikipedia.org/wiki/Private_spaceflight, abgerufen 2023/10/22

2 EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation: Gutachten 2023. https://www.e-fi.de/fileadmin/Assets/Gutachten/2023/EFI_Gutachten_2023.pdf, abgerufen 2023/10/22

3 Harry W. Jones, "The Recent Large Reduction in Space Launch Cost", 48th International Conference on Environmental System

4 *NewSpace*-Index: <https://www.newspace.im/> abgerufen 2022/01/05



Bild 2-1: Durch den Bau von Kleinsatelliten für Mega-Konstellationen wird die schnelle Internetanbindung über Satelliten zum Massenmarkt. Hier werden dutzende Satelliten mit einem Raketenstart in den Orbit transportiert. (Bild: SpaceX.)

Kommunikationsanwendungen dominieren derzeit die Nutzung von NewSpace-Plattformen, primär für die Anbindung von Nutzern in bisher terrestrisch unterversorgten Regionen, aber auch für den institutionellen und industriellen Informationsaustausch. Ein zweiter bedeutender Anwendungsbereich liegt in der Vernetzung von Sensoren und Aktoren im Internet der Dinge. So ist eine globale und mobile IoT-Vernetzung (Internet-of-Things) – unter den jeweiligen Randbedingungen wie Batteriekapazität und mögliche Antennenfläche – möglich z.B. für Umweltbeobachtungssensoren in großen Gebieten sowie für vertikale Sektoren wie die Landwirtschaft.

Das vorliegende Dokument fokussiert sich auf Kommunikationsanwendungen und die Datenanbindung. Es beschreibt den aktuellen Stand von **NewSpace Communications – NeSC**, bewertet die technischen Randbedingungen und die gesellschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung für Deutschland und Europa und gibt Empfehlungen im Sinne der Beteiligung deutscher Forschung und Industrie an Entwicklung und Nutzung. Es empfiehlt aus Sicht der ITG im VDE, welcher Einfluss und welche nachhaltige deutsche und europäische Rolle im globalen Wettbewerb angestrebt werden sollte und mit welchen Maßnahmen dies realistisch zu erreichen ist.

2.2 NewSpace Communication Systems (NeSC)

Die globale Kommunikationsabdeckung der meisten bewohnten Gebiete wird zunehmend durch terrestrische Systeme (Verkabelung/Glasfaser und/oder klassischer Mobilfunk) abgedeckt. In sehr dünn besiedelten oder schwer zugänglichen Gebieten ist dies jedoch nur mit erheblichen Investitionen gemessen an der Bevölkerungszahl bzw. am Datenverkehrsaufkommen möglich. Ein terrestrischer Ausbau erfolgt nur dann, wenn sich diese Investitionen wirtschaftlich rechtfertigen lassen. Auf See zur Versorgung des Schiffsverkehrs stehen nur Satelliten-Kommunikationsnetze zur Verfügung. Bei der Versorgung von Flugzeugen mit Kommunikationsdiensten gibt es kombinierte Lösungen aus terrestrischen und Satellitensystemen insbesondere für Langstreckenflüge.

NeSC-Systeme mit geostationären Satelliten ermöglichen einen hohen Datendurchsatz (VHTS – Very High Throughput Satellites). Zusammen mit MCs im Low-Earth-Orbit sowie HAPS wird die erforderliche globale Flächenabdeckung erreicht, aber mit – systemabhängig – beschränkter Nutzerzahl. Damit ergänzen sich diese Systeme mit terrestrischen Systemen komplementär, und ihre Nutzung wird daher auch nicht nur in terrestrisch unversorgten Gebieten gesehen.

Da sich LEO-Satelliten sehr schnell relativ zum Erdboden bewegen (~25.000 km/h) und daher ein einzelner LEO nur wenige Minuten sichtbar ist, muss dann ein anderer Satellit den Kontakt übernehmen. Entsprechend kann nur eine sehr große Flotte (Konstellation) von LEOs eine ständige Verbindung zum Nutzer am Erdboden halten. Die beiden anderen Systemtypen (GEOs und im Prinzip auch HAPS) hingegen stehen relativ zum Erdboden weitgehend still. Daher können auch einzelne Trägerplattformen dauerhaften Kontakt zum Boden halten. HAPS können sich auch in begrenztem Gebiet bewegen, je nachdem wie robust sie gegen den stratosphärischen Wind anfliegen können. Durch ihre – im Vergleich zu Satelliten – geringe Flughöhe von ca. 20 km kann ein einzelner HAP allerdings im Vergleich zu Satelliten nur eine kleine Fläche am Boden abdecken, durch die geringe Distanz zum Nutzer sind dagegen höhere Datenraten und schnellere Antwortzeiten möglich.

Terrestrische Kommunikationssysteme (zellulare Mobilfunksysteme, oder Festnetz mit WLAN) weisen pro Basisstation/Access Point sehr viel kleinere Abdeckungsgebiete auf als Satellitenkommunikationssysteme und sind auf den Bereich um ihre Funkstationen herum begrenzt. Sie gestatten aber eine hohe Kommunikationskapazität/Fläche. Die Flächenabdeckung wird dann durch ein zelluläres Netz mit vielen Basisstationen erreicht. LEO-Satelliten überfliegen hingegen je nach Orbitauslegung der MC die gesamte Erdoberfläche, sind aber in ihrer Sendeleistung und Datenrate begrenzt. Dies bestimmt wiederum ihre Flughöhe (Orbithöhe), und erfordert damit letztendlich eine sehr große Anzahl von Satelliten für eine globale und zuverlässige Erdabdeckung sowie für die zeitgleiche Versorgung vieler Nutzer in dicht besiedelten Gebieten.

Die Technologie der LEO-MCs wird wegen der großen Anzahl von Satelliten (Zehntausende) und deren Risiko für Zusammenstöße im Orbit durchaus kritisch gesehen^{5 6}. Dennoch sollte diese Technologie nicht passiv ausländischen Akteuren überlassen werden. Bei VHTS bestehen dagegen große Chancen, basierend auf deutscher und europäischer Erfahrung relativ schnell Lösungen für die hochratige Internetabdeckung insbesondere für große Gebiete und geringe simultane Teilnehmerzahlen zu erreichen, die durch terrestrische Systeme – aus den genannten technischen oder wirtschaftlichen Gründen – kaum oder gar nicht abgedeckt werden können. Dies gilt ebenso für die HAPS-Technologie, die eher für kleinere Gebiete und kurzfristigen Einsatz z.B. in Katastrophenfällen geeignet scheint.

Der wirtschaftliche Erfolg von NewSpace Kommunikationssystemen mit kostengünstigen Lösungen für Endkunden wird wesentlich von erreichbaren Skaleneffekten basierend auf internationalen Standards und niedrigen Kosten für Aufbau und Betrieb, und dem Formfaktor für Endgeräte abhängen. Daher ist die Kombination von NeSC mit den terrestrischen Mobilfunksystemen (gleiche Endgeräte, Vernetzung) auch in der Standardisierung sinnvoll.

5 „HEUMEGA – Unabhängige Trendanalyse zum Thema Megakonstellationen“, <https://www.dlr.de/rd/heumega>, abgerufen 2023/10/22

6 Daniel Voelsen: „Satelliten-Internet als europäisches Projekt“, <https://www.swp-berlin.org/publikation/satelliten-internet-als-europaeisches-projekt>, abgerufen 2021/10/23

3. Eigenschaften von NeSC-Systemen

3.1 Entwicklung der Kommunikationsarchitekturen

Die meisten Kommunikationsdienste werden über *terrestrische Mobilfunknetze* (GSM, UMTS, 4G, 5G) oder über *kabelgebundene Netze* (zunehmend mit Glasfasertechnik realisiert) erbracht und teils mit lokalen WLAN-Stationen kombiniert. Im ländlichen Raum, in Gebieten mit schwieriger Geografie, oder in Regionen mit geringer Besiedlungs- oder Nutzerdichte sind die Kosten für eine angemessene terrestrische Abdeckung allerdings hoch.

Die Satellitenkommunikation wird seit Jahrzehnten schon für Radio- und Fernsehübertragungen (Rundfunk, vgl. SES-Astra / EutelSat / Intelsat) oder auch für die direkte Kommunikationsanbindung genutzt (Iridium / Globalstar / Viasat), da die Erreichbarkeit aus dem Weltraum weniger durch Hindernisse oder geografische Einschränkungen behindert ist. Der hohe Aussichtspunkt von GEO-Satelliten (bis auf die Polregionen) und die über die gesamte Erde umlaufenden *Low Earth Orbits* erlauben eine komplette Abdeckung der Erdoberfläche. Bei geostationären Satelliten kommt aber eine für Sprachkommunikation und Echtzeitanwendungen (Spiele, Telematik) oft zu lange Verzögerung aufgrund der Signallaufzeit hinzu (mind. 230 ms). Im Vergleich dazu haben terrestrische Glasfasernetze durchschnittliche Latenzzeiten in der Größenordnung von nur wenigen zehn Millisekunden.

Das Unternehmen Iridium Communications versuchte in den Neunzigern des letzten Jahrhunderts dieses Problem zu lösen, indem es die erste Konstellation in einer niedrigen Erdumlaufbahn (LEO) aus 66 Satelliten aufbaute. Die geringe Orbithöhe (ca. 780 km) ermöglicht zwar eine geringere Latenzzeit, doch das ursprünglich geplante Geschäftsmodell von Iridium scheiterte hauptsächlich daran, dass die terrestrische Mobilfunktechnik schnell ausgebaut wurde, kostengünstiger war, und bald erheblich höhere Datenraten anbot. Zudem erfordern alle oben beschriebenen pre-NeSC Satellitenkommunikationssysteme teure und spezifische Endgeräte mit beschränkter Leistungsfähigkeit und teils „klobigen“ Antennen. Durch eine Reihe von Parametern (Distanz, Antennengewinn, Datenrate, Nutzeranzahl und Latenz) sind ihre Dienste nicht mit den heute terrestrisch verfügbaren Diensten vergleichbar. Dennoch stellen sie aufgrund ihrer weltweiten Verfügbarkeit für bestimmte Nutzergruppen wie z.B. die Seefahrt oder Expeditionen sowie abgelegene Gebiete ein wertvolles, unverzichtbares Komplement zu den landgestützten Kommunikationsdiensten dar.



Bild 3-1: Die etablierten Betreiber von Satellitenkommunikationsdiensten sind vor allem bei kommerziellen Anwendungen in abgelegenen Gebieten und für den Bedarf auf Flugzeugen und Schiffen erfolgreich. (Bild: Adobe Stock)

Moderne NewSpace-Unternehmen senken die Kosten, integrieren immer anspruchsvollere Nutzlasten in kleinere Satelliten und ermöglichen damit auch immer größere Konstellationen. Die Zuverlässigkeit und der Datendurchsatz des Gesamtsystems werden maximiert sowie Latenz und Kosten minimiert. Damit stehen diese Systeme inzwischen im Wettbewerb zu terrestrischen Kommunikationssystemen insbesondere in dünn besiedelten Gebieten und sind dann oft die einzige Möglichkeit für eine akzeptable Internetanbindung. NeSC-Systeme sollen für Kommunikationsdienste in Breitenanwendungen wie schnelles Internet, Videostreaming oder Sprach- und Videokommunikation eingesetzt werden. Die terrestrischen Technologien (5G, 6G) entwickeln sich schnell weiter und bieten steigende Leistungsfähigkeit bei fallenden Kosten. Es gelten natürlich in allen Anwendungen dieselben physikalischen Limitierungen bei Datenraten, Antennengrößen, Sendeleistung und Linkbudget für die simultane Versorgung vieler Teilnehmer am Boden. Durch neue Technologien (wie optische Inter-Satelliten-Verbindungen) können aber diverse technische „bottlenecks“ in der Vernetzung von Satelliten überwunden werden.

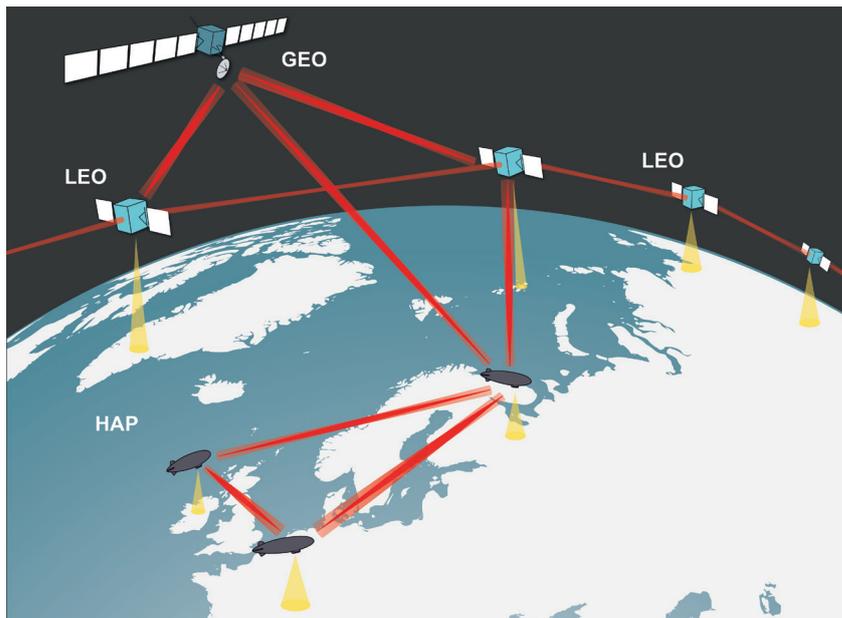


Bild 3-2: Non-Terrestrial-Networks (NTN) der Zukunft können sowohl auf LEO-Satelliten als auch auf High Altitude Platforms (HAPS) und geostationären Satelliten (VHTS) untergebrachte Knotenpunkte umfassen. Diese können über hochratige direkte optische Links mit Raumdiversität verbunden werden. Für eine gesicherte Boden-anbindung sind zusätzliche redundante RF-Verbindungen erforderlich. (Bild: DLR)

Die großen Telekommunikationsnetze von heute können also durch zusätzliche Knoten in der Erdumlaufbahn oder in der Stratosphäre erweitert werden und daher zusätzliche Netzkapazitäten bereitstellen. Darüber hinaus ermöglichen diese fliegenden Basisstationen einem Netzbetreiber, die Reichweite auf Regionen auszudehnen, in denen hochratiges Internet in der Vergangenheit nicht profitabel betrieben werden konnte: z.B. in Gebieten mit schwieriger Geographie, geringer Bevölkerungsdichte, oder in schon infrastrukturell überlasteten Gebieten. Diese nicht-terrestrischen Netze (Non-Terrestrial Networks, NTN) werden bereits im 5G-Standard berücksichtigt und ihre komplementäre Einbindung ist z.B. im 3GPP Mobilfunk-Standard vorgesehen.

Für das Internet der Dinge gibt es Sondernetze (Low-Power Wide-Area Networks – LPWAN), deren Einsatzbereiche funktional und von der Abdeckung her relativ begrenzt sind. Daher ist es für diese Bereiche von großem Interesse, wenn Kommunikationsdienste über „fliegende Basisstationen“ oder zumindest transparente Relais mit gewissen Edge-Computing Funktionen in großer Höhe und über lange Distanzen bereitgestellt werden können (z. B. Navigation und autonomes Fahren, Asset-Tracking, etc.). Diese IoT-Systeme unterliegen techno-ökonomischen Grenzen durch das begrenzte Linkbudget je nach möglicher Distanz, Antennengröße, Batteriekapazität, und Sichtverbindung zum Kommunikationspartner.

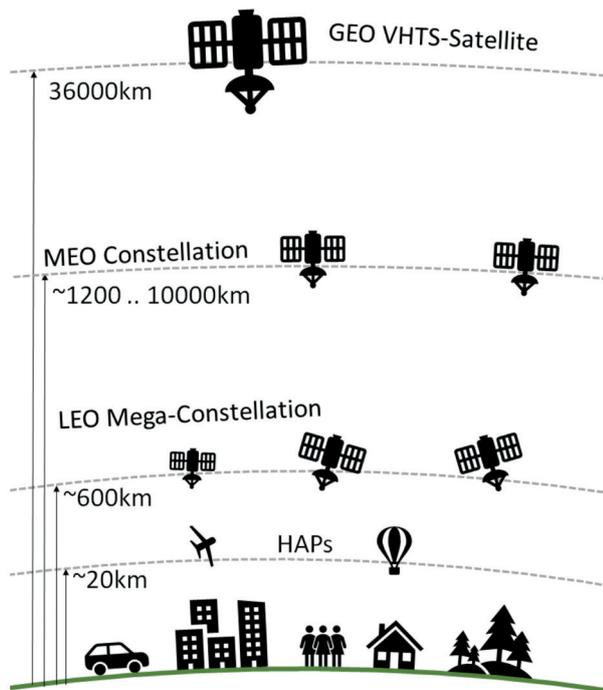


Bild 3-3: Die verschiedenen Trägertypen von NeSC: Während HAPS und GEOs quasi fix über den Nutzern stehen, bewegen sich Satelliten von LEO-MCs mit hoher Winkelgeschwindigkeit darüber hinweg, was einen ständigen Hand-over der Verbindung zum nachfolgenden Satelliten im Minutentakt erforderlich macht (Bild: DLR)

3.2 Technische Eigenschaften der NeSC-Architekturen

Die Orbitsituationen für typische Satellitenkonstellationen sind im Bild 3-4 skizziert (Orbitradius der Satellitenbahn r_s , Kommunikationsnutzer am Breitengrad θ und Längengrad φ mit Distanz zum Satelliten d). Niedrige Orbits bieten kurze Distanzen und damit höhere Signalintensität und kurze Signallaufzeit. Dafür sind die je Satellit bedienbare Erdoberfläche und die Kontaktzeiten aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Satelliten gering. Bei höheren Orbits ändern sich diese Parameter, bis beim geostationären Gürtel die Satelliten von der Erdoberfläche gesehen stillstehen und ca. ein Drittel der Erdoberfläche gesehen wird. Dafür bedingt die lange Übertragungsstrecke eine große Verzögerung in der Kommunikation. Der Bereich der sichtbaren Erdoberfläche, auch Field of View (FoV) genannt, ist größer als das effektive Versorgungsgebiet eines Satelliten, welches eine Sichtverbindung deutlich über dem minimalen Elevationswinkel 0° benötigt – typisch sind dies $\sim 30^\circ$. Die versorgte Fläche kann weiterhin in mehrere Spotbeams aufgeteilt werden, um dieselben Signalfrequenzen mehrfach verwenden zu können und damit die Nutzerdatenrate zu erhöhen.

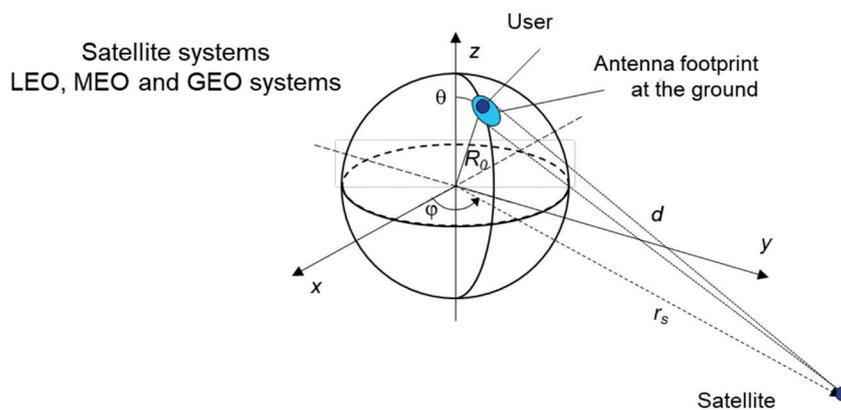


Bild 3-4: Geometrie der typischen Orbitsituation eines Kommunikationssatelliten. (Bild: W. Mohr)

Die satellitengestützten Systeme werden zunehmend unter Nutzung von NewSpace Techniken im Orbit – insbesondere bei LEO-MCs – platziert. Bei diesen NeSC-Systemen ist die mögliche Flächenabdeckung um ein Vielfaches größer als bei terrestrischen Systemen. Horizontale Abschattungen (und damit Signaldämpfung) durch Mauern oder Bäume sind geringer, wenn optische Sichtverbindung bei höheren Antennenelevationswinkeln zum Satelliten besteht. Typischerweise ist eine direkte Sichtverbindung vom Endgerät zum Satelliten erforderlich, eine Indoor-Verbindung wie im terrestrischen Mobilfunk ist also nicht möglich. Hierbei ist immer ein Kompromiss zwischen der Flächenabdeckung, der Systemkapazität z.B. im Mb/s/km² oder Mb/s/Teilnehmer und den wirtschaftlichen Bedingungen einzugehen. Dabei nähern sich die Spotbeam-Zellen von modernen Satellitensystemen an die Größe terrestrischer Macro-Mobilfunkzellen an, um damit auch vergleichbare Datenraten-Dichten zu bieten

Grundsätzliche Zusammenhänge

Bei LEO- und MEO-Systemen laufen die Satelliten typischerweise in zirkularen Orbits um die Erde. Die Umlaufgeschwindigkeit ist durch die Orbithöhe gegeben. Aufgrund der Erdrotation dreht sich die Erde unter dem Satellitenorbit. Nur in dem Spezialfall eines geostationären Satelliten (GEO) über dem Äquator entspricht die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation auch der Winkelgeschwindigkeit des Satelliten, und er steht relativ zum Beobachter auf der Erde immer an derselben Position.

Die einfache Laufzeit zwischen verschiedenen Satellitenorbits und dem darunterliegenden Erdboden kann der folgenden Grafik entnommen werden.

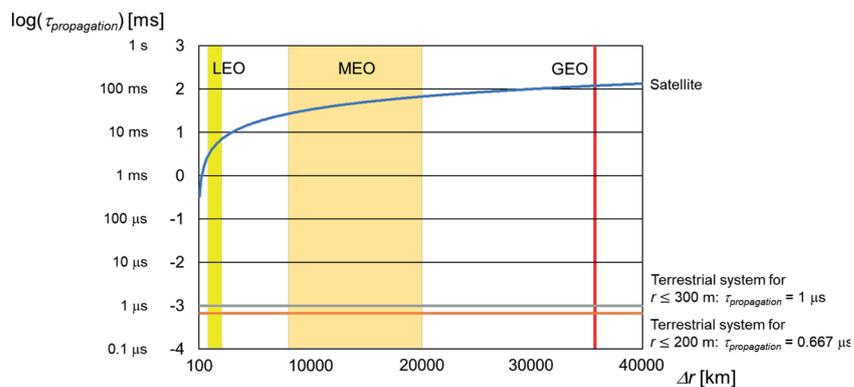


Bild 3-5: Latenz durch die einfache Linkdistanz $\tau_{\text{propagation}}$ abhängig von der Orbit-Höhe Δr für LEO, MEO- und GEO-Satelliten im Vergleich zu einem 5G terrestrischen Millimeterwellen-System mit Reichweite $r = 200$ bis 300 m. (Bild: W. Mohr)

Dabei ist zu beachten, dass sich die Laufzeit für die reine Funkausbreitung bei schräger Distanz entsprechend geometrisch erhöht. Besonders LEO-Satelliten werden aber typisch unter niedrigeren Elevationen genutzt, was wieder zu höheren Laufzeiten führt.

Aufgrund der Relativbewegung benötigt man bei LEO- und MEO-Systemen immer eine globale Konstellation vieler Satelliten damit das Ziel-Versorgungsgebiet (z.B. in Deutschland oder in Europa) immer eine Verbindung zu mindestens einem Satelliten hat⁷. Damit trägt nur ein Bruchteil der Satelliten einer Konstellation zur aktuellen Versorgung eines Landes bei. Es kann damit jedoch immer eine globale Versorgung realisiert werden. Bild 3-6 zeigt vereinfacht die prinzipielle Geometrie zwischen der Orbithöhe H_o über der Erdoberfläche, dem Öffnungswinkel θ der Satellitenantenne und dem damit erreichten Zellradius r eines Beams am Boden, während der minimale Elevationswinkel ϵ_{min} der Bodenantenne die Größe des Versorgungsgebiets und die maximale Distanz zum Nutzer d_{max} festlegt. Eine Beschreibung der Kenngrößen und Leistungsfähigkeit verschiedener Konstellationen findet sich in der Studie „Trendanalyse zum Thema Megakonstellationen“⁸.

7 In der Praxis ist die Verbindung des Versorgungsgebietes zu einem Satelliten nicht ausreichend, weil damit nur eine sehr kleine Anzahl von Nutzern bedient werden kann. Dicht besiedelte Gebiete werden daher von mehreren Satelliten mit mehreren Beams gleichzeitig versorgt.

8 „HEUMEGA – Unabhängige Trendanalyse zum Thema Megakonstellationen“, <https://www.dlr.de/rd/heumega>, abgerufen 2023/10/22

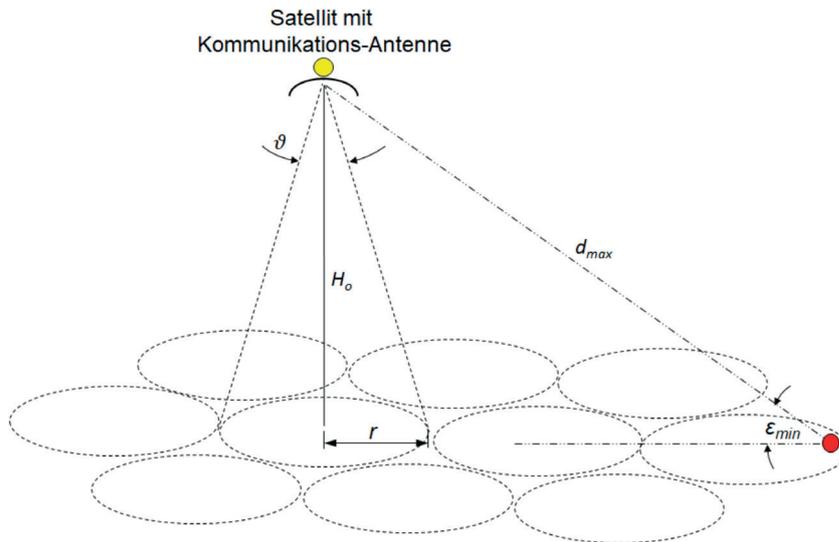


Bild 3-6: Geometrie zwischen dem Satelliten, welcher mit einer Antenne mehrere Spotbeams erzeugt, und dem Versorgungsgebiet definiert durch die Mindest-Linkelevation ϵ_{min} . Dieses Spotmuster bewegt sich mit der Satellitengeschwindigkeit über den Erdboden. (Bild: W. Mohr)

Die Größe der Satellitenantenne legt bei einer gegebenen Trägerfrequenz den Antennenöffnungswinkel, den Antennengewinn und damit auch die Zellgröße (bestrahltes Kugelsegment) am Boden fest – diese Parameter sind voneinander abhängig. Ein Satellit kann entweder direkt die gesamte Zelle mit einer Antenne ausleuchten oder mehrere Beams zur Erhöhung der Systemkapazität erzeugen. In Anwendungen zur Breitbandversorgung kommen ausschließlich Systeme mit mehreren Beams infrage, wobei diese elektronisch geformt und nachgeführt werden. Das digitale Beamforming wird zudem verwendet, um Interferenzen innerhalb des Systems sowie zwischen Systemen durch Vorcodierung und Signalverarbeitung zu beherrschen. Auch Mehrantennenkommunikation und räumliches Multiplex werden eingesetzt. Terrestrische Systemen verwenden vergleichbare Technologien.

Im folgenden Beispiel einer LEO-MC wird eine Orbithöhe von 500 km angenommen. Jeder Satellit erzeugt viele Spotbeams, und die Mindestelevation Nutzer-Satellit liegt typisch bei 35° . Das durch einen Satelliten versorgbare Gebiet hat damit – ohne Erdkrümmung gerechnet - einen Radius von $Orbithöhe/\tan(35^\circ) = 714 \text{ km}$. Die ganze Globusfläche könnte also idealerweise mit 318 Satelliten abgedeckt werden, und für Deutschland reichte etwa ein Satellit. Dem steht aber die ungleichmäßige Verteilung der Satelliten im Orbit entgegen: bei polaren Umlaufbahnen ist die Satellitendichte in der Nähe der Erdpole deutlich größer als am Äquator, zudem erzwingt die Dynamik der Satellitenbewegung immer wieder „weiße Flecken“, während andere Gebiete zeitweise von etlichen Satelliten gleichzeitig abgedeckt werden. Die erforderliche Zuverlässigkeit eines Kommunikationssystems bedingt daher deutlicher mehr Satelliten. Ebenso steigert eine absichtliche Kapazitätserhöhung durch Mehrfachabdeckung von Gebieten mit hoher Nutzerdichte die Satellitenanzahl. Diese Anforderungen führen daher typisch zu mehreren Tausend Satelliten im niedrigen Erdbit.

Die Flächenabdeckung ist entscheidend für die Effizienz pro Kommunikationssatellit: Höhere Orbits ermöglichen eine größere Abdeckung mit weniger Satelliten, gleichzeitig erhöht die größere Entfernung aber die Signallaufzeit. Zudem muss dann ein Satellit auch mehr aggregierten Datenverkehr bewältigen bzw. er kann nur eine geringere Flächenkapazität und Datenrate pro Nutzer bereitstellen. Um am Boden dieselbe Spotgröße zu bieten, müssen die Satellitenantennen für höhere Orbits deutlich vergrößert und die Spotanzahl erhöht werden, und der Satellit muss insgesamt entsprechend der versorgten Fläche und größeren aggregierten Datenmengen mehr Sendeleistung erzeugen. Trotzdem ist die mit höherem Orbit verbundene Reduktion der Satellitenanzahl ein großer Vorteil: eine Verdoppelung der Höhe (auf 1000 km) erfordert nur etwa $\frac{1}{4}$ an Satelliten für globale Abdeckung. Diese Parameter haben einen wesentlichen Einfluss auf die verfügbare Datenrate eines aktiven Nutzers am Boden und die Anzahl der simultan zu versorgenden Kommunikationsverbindungen.

Bei einer dünn besiedelten Bevölkerungsstruktur (ländlicher Raum) ist die Realisierung der Internetbreitbandversorgung durch Satelliten ein triviales Problem: es kann der komplette ländliche Raum ausgeleuchtet werden. Eine Versorgung der einzelnen Gemeinden kann nun zielgerichtet mit verschiedenen Spot-Beams gewährleistet werden.

Im Gegensatz dazu steht der städtische Raum mit einer dicht besiedelten Bevölkerungsstruktur: Hier bieten die LEO-MCs keinen natürlichen Vorteil im Vergleich zu anderen Breitbandversorgungsmöglichkeiten, da die wenigen Spot-Beams eine Breitbandversorgung vieler Nutzer auf kleiner Fläche nicht bewältigen können. Eine potenziell ausreichende Breitbandversorgung ist nur durch den Ausbau von jetzigen terrestrischen Systemen plus dem Aufbau von neuen LEO-MCs erzielbar.

Die Weiterleitung des Datenaufkommens kann direkt von jedem Satelliten zum Boden mit entsprechender Funktechnik erfolgen. Dazu muss dann aber eine Vielzahl von entsprechenden Bodenstationen global verfügbar sein. Eine effizientere Lösung besteht darin, die Satelliten auch untereinander über optische Kommunikationsterminals zu vernetzen (sog. OISLs, Optische Inter-Satellite Links), welche mit minimaler Signaldivergenz interferenzfrei Datenmengen zukünftig bis zu 10 Tb/s übertragen können. RF-Bodenstationen in unwirtlichen Gegenden werden damit überflüssig, der Datenverkehr muss nicht mehr unter jedem Satelliten, sondern nur an wenigen Punkten im Netzwerk zur Erde übertragen werden. Auch diese Satellite-Ground Links können zukünftig optisch erfolgen, wobei nur solche optischen Bodenstationen genutzt werden, welche gerade nicht von Bewölkung betroffen sind. Während zwar Bevölkerungsballungsräume mit mehreren Millionen Nutzern weiterhin über Glasfasernetze und WLAN bzw. GSM versorgt werden müssen, können ländliche Gebiete gut über Satellitendienste abgedeckt werden.

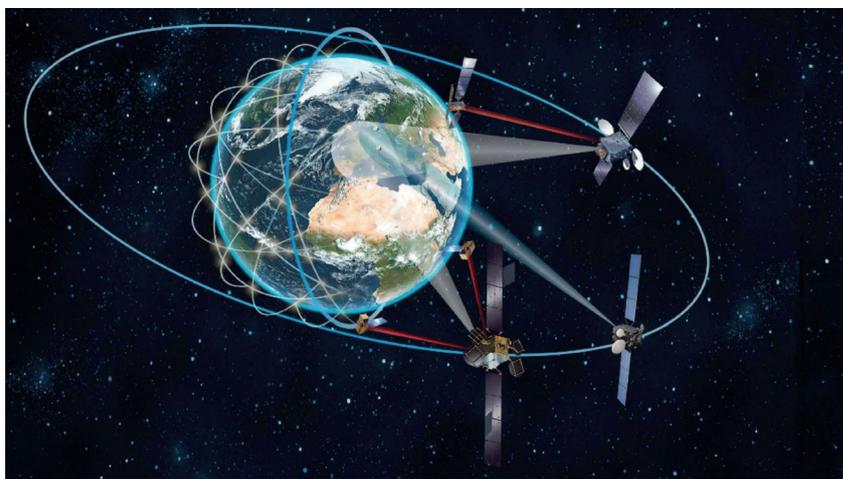


Bild 3-7: Schematische Darstellung einer LEO Megakonstellation im erdnahen Orbit und deren Vernetzung über OISLs mit wenigen GEOs. (Bild: DLR)

In praktischen Systemen sind die Satellitenzellen (Spotbeams) jedoch größer als bei terrestrischen Breitbandsystemen und hätten damit wesentlich mehr potenzielle Nutzer zu versorgen. Aufgrund der Anzahl der Satelliten in einer Mega-Constellation und der Orbithöhe ergeben sich direkt die Freiraumdämpfung und bei einer realisierbaren Satelliten-Sendeleistung die aggregierte mögliche Datenrate für das Versorgungsgebiet. Wenn ein Satellit mehrere Beams unterstützt, erhöht sich die erforderlich aggregierte Leistung entsprechend. Alle diese Parameter sind voneinander abhängig und daher nicht frei wählbar.

Satelliten im GEO (Geostationary Earth Orbit) werden von einem Punkt auf der Erdoberfläche immer am gleichen Ort am Himmel gesehen und eignen sich so für starr ausgerichtete Bodenantennen. Mit solchen einfachen und kostengünstigen Parabolantennen können größere Antennengewinne realisiert und damit die lange GEO-Distanz (bis 40.000 km) überbrückt werden. Mobile Geräte ohne Richtantenne sind aber vom GEO nicht direkt mit hoher Datenrate anbindbar. Zudem stört die lange Laufzeit der Signale die Sprachkommunikation. Neue GEO-Systeme (VHTS) steigern den Datendurchsatz bis hin zu Terabit pro Sekunde, und zählen auch zu NeSC⁹. Daneben bieten VHTS auch die Möglichkeit der Anbindung mobiler Plattformen, insbesondere im aeronautischen Bereich (Inflight-Entertainment). Auch der IoT-Markt wird zunehmend adressiert, indem spezielle Übertragungsverfahren für sehr niedrige Datenraten und Sendeleistungen auch die Anbindung von IoT-Sendern an geostationäre Satelliten erlauben. Solche Sensoren sind für die Überwachung von Anlagentechnik, für die Logistik sowie für die Landwirtschaft relevant. Die deutsche Wissenschaft und Industrie gehören zu den Innovationstreibern.

9 Knopp, „Breitband über Satellit“ – 6. nationale Konferenz zur Satellitenkommunikation, Bonn 2019

High Altitude Platform Systems (HAPS) sind fliegende Plattformen in einer Höhe an der Grenze der Stratosphäre^{10 11}. Große Vorteile gegenüber beiden Satellitensystemen (LEO und MEO) bestehen in der geringeren Distanz zwischen Nutzer und Basisstation (typisch kleiner ein Zehntel der von MC-Systemen) und der Möglichkeit, die fliegenden Komponenten und Systeme zur Wartung und Neubetankung für den Treibstoff zurückzuholen. Eine Herausforderung ist allerdings die geringe Tragfähigkeit bei dauerhaftem (24/7 – monatelangem) Einsatz und die kleinere abdeckbare Fläche auf dem Boden, die sich zwischen der Abdeckung eines Satellitensystems und eines terrestrischen Systems bewegen. Allerdings passt eine kleinere zu bedienende Fläche auch mit geringem Equipmentgewicht zusammen.

Von HAPS aus wird auch die direkte Anbindung von handelsüblichen mobilen Geräten wie Handys und Laptops ermöglicht, da der Funkweg hier wesentlich kürzer als bei Satellitensystemen ist (dutzende versus hunderte von km).

Eine ganzheitliche Betrachtung eines NeSC-Kommunikationssystems erfordert die Berücksichtigung verschiedener Parameter: welche maximal verfügbare aggregierte Datenrate/Zellgröße und Datenrate/Teilnehmer sind möglich und welche Geschäftsmodelle ergeben sich daraus. Bild 3-8 zeigt dies stark vereinfacht am Beispiel eines HAPS-Systems.

Es wird bei HAPS noch der kommerzielle Markt gesucht, eine Dynamik wie im Bereich der LEO-MCs ist derzeit nicht zu beobachten. Technisch erscheint das Konzept aber äußerst vielversprechend, insbesondere was den selektiven lokalen Einsatz (z.B. bei Katastrophenfällen zum schnellen Aufbau einer Kommunikationsinfrastruktur), die Fähigkeit solcher Systeme zu Wartung und Upgrade, und vor dem Hintergrund des Kollisionsrisikos bei Mega-Constellations (siehe Kapitel 5.6) angeht.

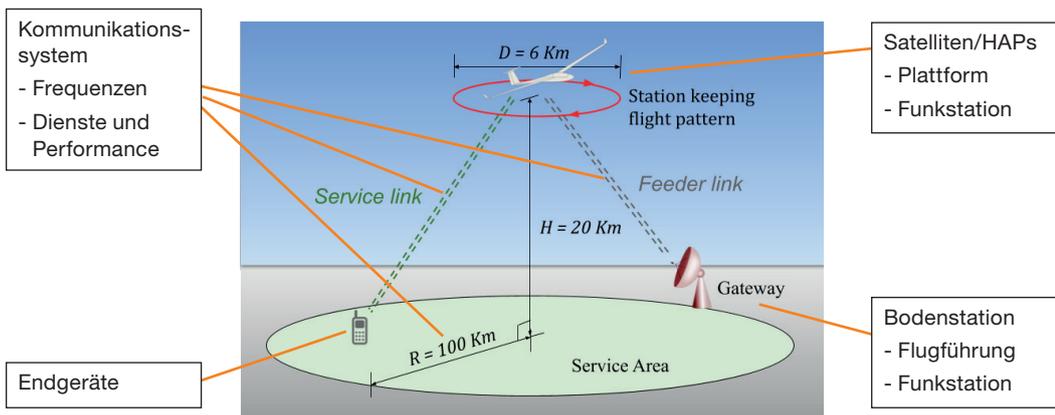


Bild 3-8: Systemkomponenten und Randbedingungen von HAP-Systemen (Bild: Nokia)

10 VDE-ITGnews 1/2021, "Overview of High-Altitude Platform Stations (HAPS)", Jan 2021

11 A. Grabs, "Unmanned Aerial Systems – Solutions for Military and Commercial Applications", Airbus, Sept 2018

3.3 Eigenschaften der verschiedenen NeSC-Arten

Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht wichtiger Parameterwerte der drei NeSC-Typen, wobei Werte auf Basis typischer Systemauslegung angegeben werden.

	LEO-Mega-Constellations	GEO-VHTS und MEO	HAPS
Aufwand	Tausende Satelliten im LEO	3 GEO-Satelliten für globale Abdeckung (außer Polregionen), Dutzende Satelliten für die MEO-Konstellation O3B	Lokales System: abhängig vom zu versorgenden Gebiet
Systemkosten, nur Netz-Infrastruktur (ohne Endgeräte)	Mehrere Milliarden EUR	ca. 1 Milliarde. EUR	~20 Millionen EUR pro HAP, Vernetzung möglich
Versorgbares Gebiet	Global	Kontinent, globales System möglich	Lokal, einige 1000 qkm
Kundenanzahl	Möglicher Durchsatz des Systems begrenzt die Anzahl auf wenige Millionen	ca. 1-10 Millionen Nutzer	noch offen {je HAP vergleichbar Makrozellen im terrestrischen Mobilfunk}
Zuverlässigkeit der Datenanbindung	Steigt mit Satellitenanzahl	99,99%	unklar
Latenzzeit	> ~10 ms	> ~70...230 ms	> ~0,6ms
Kosten je Endnutzer / Monat	100 € + Antenne	[50...100] € + 600 € einmalig	Vergleichbar bis teurer als terrestrische Systeme
Infrastruktur für den Endnutzer	Teils spezielle Endgeräte mit größeren Antennen als bei terrestrischen Endgeräten	Starre 80 cm Parabolantenne, keine direkte Mobilanwendung	Wahrscheinlich die gleichen Endgeräte wie für terrestrische Systeme
Kompatibilität von Endgeräten	Könnte gleicher Funkstandard sein wie für terrestrische Systeme, aber es muss eine größere Dämpfung überbrückt werden	Wenn von Bodenstationen lokale Netze aufgebaut werden, können dies dieselben terrestrischen Endgeräte sein aber mit geringer Datenrate, sonst ist dies nur eine stationäre Lösung	Könnte gleicher Funkstandard sein wie für terrestrische Systeme
Reifegrad	Roll-out	Roll-out	In Erprobung
Risiken	Kollisionen im LEO würden die Raumfahrt dauerhaft erheblich beeinträchtigen	Nur beim Start (gering, da über unbewohntem Gebiet)	Für Flugverkehr - gering, da HAPS weit höher stationiert werden

4. Aktuelle Systeme

4.1 Mega-Constellations

Mit Satellitensystemen können die "weißen Flecken" auf der Abdeckungslandkarte stark reduziert werden, da die versorgbare Erdoberfläche nur durch Satellitendichte und der Größe der von einem Satelliten jeweils abgedeckten Fläche begrenzt wird.

Existierende ältere Konstellationen (Iridium, Globalstar) bieten nicht den Datendurchsatz und die Abdeckung von modernen Mega-Constellations, konzentrieren sich auf Sprachdienste aber bieten mittlerweile auch Datendienste an. Ihre Datenraten und die hohe Verzögerung sind aber deutlich ungünstiger als bei modernen LEO-MC-Systemen.

Eine Herausforderung bei allen Satellitensystemen ist die Entfernung zum Nutzer, welche die Linkqualität und Signalverzögerung festlegt, wobei Nutzer idealerweise über ein kleines Mobilfunkgerät angebunden werden sollen. Daher werden diese MCs auch in geringer Orbithöhe eingebracht, was aber wiederum geometrisch bedingt eine hohe Anzahl von Satelliten erfordert, um die Erdoberfläche zuverlässig abzudecken. Gleichzeitig wird dieser erdnahe Orbitbereich zunehmend mit Satelliten überfüllt und das Risiko von Kollisionen untereinander steigt. Dies gilt insbesondere für die MC-Satelliten, die über keinen eigenen Antrieb verfügen, um anderen Objekten auszuweichen. Neben den hochrati- gen Anwendungen bieten die MCs auch Möglichkeiten zur Unterstützung des Internet-of-Things (IoT), indem z.B. kleine energieeffiziente Sensoren über mittlere bis kleine Datenraten weltweit angebunden werden können. Mögliche Applikationen des Satelliten IoT finden sich z.B. in Fahrzeugen (SpaceX-Antenne auf dem Dach eines Tesla), dem Asset-Tracking oder der Wartung von Industrieanlagen (Offshore-Windkraft).

Folgende LEO-MCs für Kommunikationsanwendungen werden derzeit aufgebaut bzw. sind in der Planung, eine ausführliche Beschreibung aktueller LEO-MCs findet sich in¹² und¹³.

- **Starlink-Konstellation**¹⁴, initiiert von SpaceX, Stand Dezember 2022 sind über 3000 Starlink-Satelliten im Orbit, welche mit den teils wiederverwendbaren Falcon 9 Raketen von SpaceX in den Orbit gebracht werden. Geplant sind in verschiedenen Orbithöhen bis zu 10.000 Satelliten. Seit November 2020 hat Starlink auch in Deutschland den Betrieb aufgenommen und Services ausgerollt. Mit 99,- EUR/Monat und 499,- EUR Einmalkosten für Equipment ist das System allerdings keine Konkurrenz zu etablierten Kabelsystemen, und daher weiterhin nur in Gebieten ohne Internetanbindung interessant.
- **OneWeb**: die "OneWeb Satellite Constellation" hatte bereits 68 von 650 geplanten Satelliten in einen niedrigen LEO gebracht, bevor es zu Verzögerungen kam. Inzwischen sind mehrere Investoren beteiligt. So zieht die britische Regierung zusammen mit einem indischen Investor in Erwägung, OneWeb um eine Navigationspayload zu erweitern und damit eine eigene Weltraumressource für die Zeit nach dem Brexit zu schaffen. Im letzten Jahr hat auch Hanwha Systems Investitionen in OneWeb getätigt und Eutelsat hat als größter Teilhaber insgesamt 50% Firmenanteil erworben. Zulieferer ist Airbus Defence and Space zusammen mit OneWeb selbst. Seit Weiterführung des Projekts sind jetzt 66% der geplanten Satelliten im Orbit¹⁵.
- **Telesat-LightSpeed** (<https://www.telesat.com/>) ist eine kanadische Firma, die 117 LEO-Satelliten im System „Lightspeed“ vorschlägt. Im Juli 2018 hat Telesat eine Vereinbarung mit Thales und Maxar (Space System Loral) für die Durchführung des Systemdesigns geschlossen. Eine Abdeckung von ganz Nordamerika ist im ersten Ausbau der MC geplant, welche von ihrer existierenden GEO-Satellitenplattform unterstützt werden kann. Eine kooperierende Architektur zwischen GEO und LEO-Satelliten kann somit eine zuverlässigere und flexiblere Serviceabdeckung gewährleisten.

¹² „HEUMEGA – Unabhängige Trendanalyse zum Thema Megakonstellationen“, <https://www.dlr.de/rd/heumega>, abgerufen 2023/10/22

¹³ N. Pachler, I. del Portillo, E.F. Crawley, B.G. Cameron, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband", 2021 IEEE International Conference on Communications Workshop (ICC Workshop), Montreal, 2021

¹⁴ K. Obermann „Leistungsfähigkeit von Satelliteninternet gemäß dem Starlink-Konzept“, Studie im Auftrag vom Bundesverband Breitbandkommunikation, Juli 2021

¹⁵ OneWeb, „OneWeb Holdings Limited Annual Report & Accounts“, https://assets.oneweb.net/s3fs-public/2022-08/AnnualReport_2022.pdf abgerufen 2022/12/08

- **Amazon-Kuiper** (Wikipedia: Projekt Kuiper. https://de.wikipedia.org/wiki/Projekt_Kuiper, by Amazon): Amazon kündigte im April 2019 an, eine große Breitband-Konstellation zu finanzieren. Geplant sind 3236 Satelliten in 98 Orbit Ebenen und drei Orbit Schalen in 590 km, 610 km und 630 km Höhe. Außerhalb des Breitbandservices wird Amazon auch die Anbindung ihrer MC mit Amazon Web Services (AWS) anstreben.
- **KLEO-Connect:** KLEO ist ein globales Netzwerk-, Datenmanagement- und Anwendungsunternehmen, dessen Ziel es ist, die „Digitalisierung und Geschäftstransformation aus dem Weltraum“ innerhalb des globalen Marktes für das industrielle Internet der Dinge (IIoT) voranzutreiben. KLEO plant dafür die Realisierung einer MC mit 288 Satelliten in einer Orbithöhe von 1050 km.
- **AST-SpaceMobile¹⁶:** versucht die direkte Anbindung ihrer MC zu klassischen Endnutzengeräten (Handys, Tablets, Laptops, etc.) zur Daten- und Sprachkommunikation. Die Realisierung bedeutet ein herausforderndes Linkbudget, das durch extrem große Satellitenantennen ermöglicht werden soll. Die Kommunikation soll mit 5G-Mobilgeräten kompatibel sein. AST-SpaceMobile hat mit Vodafone und Rakuten Investoren zur Unterstützung ihres direkten Mobilfunkservices in Afrika und Asien. Die Konstellation wird bei einer Orbithöhe von ca. 400 km operieren und einen Datendurchsatz pro Zelle zwischen 120 Mb/s und 750 Mb/s anbieten. Ihr erster Satellit Bluewalker 3 wurde im September 2022 in den Orbit gebracht.¹⁷
- **O3B-MEO und O3B-mPower¹⁸:** Einen anderen Ansatz verfolgt O3B, bei dem ein langsam wandernder Satellitengürtel über dem Äquator im MEO (Medium Earth Orbit in ca. 8000 km Höhe) zwar deutlich weiter entfernt ist als die LEO-MCs, aber noch nahe genug am Nutzer, um die langen Verzögerungen zum GEO zu vermeiden. Hierbei konzentriert man sich auf die mit Kommunikationsdiensten unterversorgten äquatornahen Gebiete und auf maritime Anwendungen mit einem Fokus auf die Kreuzfahrtindustrie. Eine separate Satellitenantenne ist erforderlich.
- **China SatNet (vormals „Chinesisches „Guowang“)¹⁹:** SatNet ist eine geplante chinesische Breitbandinternetkonstellation mit 12,992 Satelliten. Sie wird von der chinesischen Regierung gedeckt und als Gegeninitiative zu Starlink (USA) geplant. Eine gezielte Einführung mit staatseigenen Launchern (Long March 9) ist dabei auch beabsichtigt. Nähere technische Informationen zur Konstellation und Zeitplan der Durchführung sind unbekannt.
- **IRIS2:** Diese europäische Initiative wurde im November 2022 ins Leben gerufen. Geplant ist eine multi-orbit Konstellation, d.h. eine Konstellation bestehend aus LEO-, MEO- und GEO-Satelliten. Auf Erfahrungen basierend auf GovSatCom und EuroQCI wird ein erstes Design der Konstellation gestaltet. Dabei steht die staatliche Bedienung (z.B. Verknüpfung von Schlüsselinfrastrukturen in der EU oder das Krisenmanagement) im Vordergrund, aber auch der kommerzielle Service (z.B. 5G++ Integration und IoT). Erster Service von IRIS2 soll schon 2024 mit den vorhandenen Gov-SatCom GEO-Satelliten verfügbar gestellt werden²⁰.

Das Starlink-System als Beispiel einer LEO-MC

Starlink ist ein vom US-Raumfahrtunternehmen SpaceX betriebenes Satellitennetzwerk. Es soll künftig Endnutzern weltweiten Internetzugang bieten. Bis 2027 hat SpaceX die Genehmigung, 11.927 Satelliten in den erdnahen Orbit (LEO) zu bringen. Beantragt sind außerdem 30.000 weitere Starlink-Satelliten. Starlink-Satelliten befinden sich derzeit in Orbits zwischen 540 km und 1.300 km Höhe. Eine von der Federal Communications Commission (FCC) genehmigte Lizenzänderung vom 27. April 2021 ermöglicht SpaceX, insgesamt 2.814 Satelliten, die ursprünglich für höhere Umlaufbahnen geplant waren, auf Orbithöhen von 540 bis 570 Kilometern zu betreiben. Dadurch kann SpaceX seine Konstellation aus orbitalmechanischer Perspektive weiter optimieren. Die Konstellation nutzt einen 53° inklinierten Orbit mit 72 Umlaufebenen und 22 Satelliten pro Ebene. Versorgt werden können damit vor allem die industrialisierten Regionen Nordamerikas und Europas mit mehr als 30 gleichzeitig sichtbaren Satelliten. Der minimale Elevationswinkel, mit dem ein Starlink Nutzerterminal (60 cm Phased

16 SpaceMobile Website. <https://ast-science.com/>, abgerufen 2023/10/22

17 D. Jackson, "Life Saving Technology: AST SpaceMobile CEO outlines capabilities of direct-to-smartphone LEO satellite service". <https://urgentcomm.com/2021/04/09/life-saving-technology-ast-spacemobile-ceo-outlines-capabilities-of-direct-to-smartphone-leo-satellite-service/>, abgerufen 2023/10/22

18 SES, "O3B mPower". <https://www.ses.com/o3b-mpower>, abgerufen 2023/10/22

19 Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/China_Satellite_Network_Corporation, abgerufen 2023/10/22

20 Dominik Hayes, "European Space-based Secure Connectivity System IRIS2", EU-Kommission Defence Industry and Space

Array) betrieben werden kann, beträgt knapp 25°, weshalb Gebiete über 61° geografischer Breite in der ersten Phase nicht erreicht werden können. Das FoV (Field of View) der Starlink Satelliten beträgt ca. 280.000 km² (Boresight), wobei ein einzelner Beam nur einen Durchmesser von 8 km (Nadir) hat. Über die Starlink Antenne und die Systemkapazitäten sind keine exakten Daten bekannt, jedoch können aus den Unterlagen zur ITU Frequenzanmeldung Rückschlüsse gezogen werden. Demnach nutzt ein Satellit mindestens 4 räumliche Beams mit einer Bandbreite von bis zu 500 MHz. Aus den angegebenen Modulations-Codierungs-Kombinationen ergeben sich Satellitenkapazitäten zwischen 10 Gb/s und 20 Gb/s, teilweise auch etwas mehr. In der derzeitigen Beta-Testphase erreicht Starlink Datenraten von 40 – 93 Mb/s in den USA und mittlere Latenzwerte von 31 ms bis hin zu 88 ms. Damit können theoretisch etwa 100 bis 300 Nutzer pro Beam versorgt werden, jedoch zeigen praktische Tests, dass über eine Kombination aus FDMA und TDMA ein hoch adaptives System aufgebaut wird, das mehr Nutzer je nach Datenratenanforderung adaptiv bedienen kann. Hinzu kommt der systemtypische Diversity-Faktor (Überbuchungsfaktor), der üblicherweise nicht bekannt ist, aber Faktoren über 100 annehmen kann. Vor diesem Hintergrund ist die simultan versorgbare Anzahl von Nutzern bei gegebener Beamgröße durchaus mit terrestrischen Systemen vergleichbar, jedoch werden viele Satelliten benötigt, um ein Versorgungsgebiet wie Deutschland abzudecken. SpaceX prognostiziert für die vollständig ausgebaute MC Datenraten von 300 Mb/s und Latenzen von circa 20 ms für den Endnutzer. Die gesteckten Ziele kann Starlink primär durch die Verwendung von optischen Inter-Satelliten-Links erreichen. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die Starlink-Konstellation am stärksten von der Verwendung von ISLs (Inter-Satelliten-Links) profitiert, zumal dadurch die Anzahl der erforderlichen Gateway Stationen drastisch reduziert werden kann²¹. Außerhalb der Integration von neuer Technologie (z.B. ISL) können auch existierende Eigenschaften der Satellitenkonstellation geändert werden, um somit einen Hebel für die Erhöhung von Datenraten und die Reduzierung von Systemkosten zu ermöglichen. Insbesondere ist die Orbithöhe ein ausschlaggebender Faktor, bei dem die Reduzierung der Ausgangsorbithöhe von 500 km um 0.5% (2,5 km) eine Systemkostenreduzierung von 1% bewirkt²².

Vergleich verschiedener LEO-MCs (Auswahl, Stand Jan 2022):

	StarLink		OneWeb	Telesat	Kuiper
Satellitenanzahl	7,518	4,408 ²³	6,400	298	3,236
Orbithöhe(n) (km)	335 - 346	540 - 570	1,200	1,325	TBA
Versorgbares Gebiet / Breitengrade	Weltweit, 2,6 Millionen qkm pro Satellit		Weltweit, 1,47 Millionen qkm pro Satellit	Weltweit, 13,8 Millionen qkm pro Satellit	Weltweit, 1,7 Millionen qkm pro Satellit
Kunden-Datenrate	Bis zu 150 Mb/s		200 Mb/s	Bis zu 7.5 Gb/s ²⁴	Bis zu 400 Mb/s
Nutzerantenne	Elektronisch gesteuertes Phased-Array		Elektronisch gesteuertes Phased-Array	Elektronisch gesteuertes Phased-Array	Elektronisch gesteuertes Phased-Array
Aufnahme des Dienstes	Mitte 2021 (beta testing)		Ende 2022	2022 erster Start von Satelliten	2026 Start von mind. 1600 Satelliten geplant
Reifegrad 2022	Derzeit im Ausbau		Derzeit im Ausbau	In Erprobung	In Planung
Launcher	SpaceX		Airbus	Blue Origin/Relativity Space	ULA
Betreiber / Konsortium	SpaceX / Elon Musk		Bharti Global / VK Regierung / Eutelsat	Telesat	Amazon

4.2 GEO-VHTS und MEO-Systeme

Im Markt der GEO-VHTS sind die klassischen GEO-Betreiber EutelSat (System **Konnext**), und ViaSat (**Viasat Internet**) zu nennen. Von diesen werden zu starren Bodenantennen (z.B. auf Hausdächern) Nutzerdatenraten bis zu 100 Mb/s angeboten. **O3B** und **O3B mPOWER** (betrieben von „SES Networks“) besteht aus einem äquatorialen Gürtel von MEO-Satelliten in 8063 km Höhe. Damit wandern diese fünfmal am Tag um die Erde und sind also von einem Ort auf der Erde viel länger zu sehen als die Satelliten einer LEO-MC. Signalverzögerung und Freiraumdämpfung sind bei dieser Entfernung noch sehr viel günstiger als bei Kommunikationssatelliten im GEO. Breitengrade bis +/-50° können bedient werden, und damit die bevölkerungsreichen Gebiete in Afrika, Indien, und Südamerika versorgen.

21 I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, "A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," *Acta Astronautica*, vol. 159, pp. 123–135, June 2019.

22 K. T. Li, C. A. Hofmann, F. Völk and A. Knopp, „Techno-Economic Design Aspects of Satellite Mega-Constellations for 6G Services,“ 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), 2021, pp. 01-06.

23 von der FCC anerkannt in 2018.

24 Telesat-Übertragungsraten finden sich in <https://www.telesat.com/blog/doing-global-good-leo-satellites-bring-speed-capacity-to-human-welfare-initiatives/>, abgerufen 2023/10/22

Internet-of-Things mit GEO-Anbindung

Es werden spezielle Satellitenkonstellationen für Internet-of-Things Anwendungen geplant oder dedizierte Dienste, z.B. Positionierung von Schiffen / Zügen / LKW usw. Der IoT Markt wird zunehmend adressiert, indem spezielle Übertragungsverfahren die Anbindung von kleinen, energieeffizienten IoT-Sendern mit sehr niedrigen Datenraten und Sendeleistungen an GEO-Satelliten erlaubt. Aus dem GEO ist es erheblich schwerer, mit IoT Sendern zu kommunizieren. Unter Einhaltung der ITU-Regeln für die EPFD (Equivalent Power Flux Density) kann mit einem 2 €-Münze großen Sender ca. 10-30 bit/s im GEO erreicht werden. Für eine möglichst leistungseffiziente Übertragung werden spezielle Verfahren benötigt, die auf kostengünstiger Hardware basieren und über mehrere Sekunden die Synchronisation zu einem GEO-Satelliten halten können. Ein Ansatz ist, auf die mittlerweile weit verbreiteten Low Power Wide Area Network (LPWAN)-Verfahren zurückzugreifen. Der größte Nachteil für die meisten dieser Verfahren besteht jedoch darin, dass die Anzahl der Nutzer – aufgrund von Inter-User-Interferenzen – stark begrenzt bleibt. Diese Kommunikationstechnologien haben ihren Ursprung in terrestrischen IoT-Netzwerken und leben davon, dass sich die Leistung der Nutzer stark unterscheidet, was jedoch zu Satelliten kaum der Fall ist. Eine Ausnahme bilden UCSS und MIOTY (siehe Abkürzungsverzeichnis), die beide für hohe Nutzerzahlen in Interferenzszenarien ausgelegt wurden. Es konnte bereits gezeigt werden, dass diese eine stabile IoT-Verbindung zum GEO aufbauen können.

4.3 High-Altitude-Platform Systeme

Zu nennen sind momentan die Technologien von **LOON** (Ballons, von Fa. Alphabet), **Zephyr** und **KEA-Aerospace** (aerodynamisch), und **Stratobus** (Aerostaten). Allerdings wurde LOON in 2021 aus Kostengründen eingestellt²⁵. Aktuelle Ansätze planen eine Stationierungshöhe von ca. 20 km und können je nach Gestaltung der Plattform mehrere 10 kg Nutzlast tragen bei mehr als 90 Tagen Flugdauer. Neben Kommunikation wird der Schwerpunkt auf Erdbeobachtung gelegt.

25 „Google to shut down Loon“, <https://spacenews.com/google-to-shut-down-loon/>, abgerufen 2023/10/22

5. Herausforderungen und Chancen durch NewSpace-Communications

5.1 Motivationen der Player und wirtschaftliche Bedeutung

Noch in den frühen 2000er Jahren zielte die Motivation zum Aufbau von Satelliten-Konstellationen in niedrigen und mittleren Erdorbits gemäß dem Marketing einschlägiger NeSC-Player auf die Anbindung unterentwickelter Regionen an das Internet – nicht umsonst wurde eine der ersten Konstellationen die „Other Three Billion“ (O3B) getauft. Mittlerweile ist dieses idealistische Ziel mehr kommerziellen Interessen gewichen, da sich die hohen Investitionen in eine Satellitenkonstellation kaum über eine Nutzung durch finanziell schwache Bevölkerungsschichten amortisieren.

Geschäftsmodelle basieren heute auf (s. auch Bild 5-1):

- klassischen Satelliten-Kommunikationsdiensten (Telekommunikation und Broadcasting),
- personalisierter Werbung und Verkauf von Nutzerdaten,
- auch militärische Dienste.

	Broadband Internet Customers				Mobility					Region				
	Consumer Broadband	Enterprise Broadband	Mil/Gov Broadband	IoT Services Broadband	Fixed	Trans-portable	Landmobile	Aero-nautical	Maritime	North America	Europe	Africa & Middle East	Asia Pacific	Rest of the World
Starlink	①	③	①	③	①	②	②	②	②	①	②		③	
Kuiper	①	①	②	③	①	②	②	②	②	①	②		③	
OneWeb	②	①	②	③	①	②	②	②	②		①	③	③	
Lightspeed	-	①	②	③	①	②	②	②	②	①			③	
O3b mPower	-	①	②	-	①	②	②	②	①		③	①	②	①
AST Space Mobile	①	-	-	②	-	①	①	-	①			①	②	③
KLEO	-	①	①	-	①	②	②	①	①	①	①	①	①	①

Prioritization of Market Entry ①, ②, ③

Bild 5-1: Marktzugang und -entwicklung der größten Konstellationsbetreiber

Die Motivation „Ubiquitous Communications“ für Satellitensysteme relativiert sich je nach Nutzerkreis, da sich der Großteil der Anwender von Internetdiensten in den seltensten Fällen wirklich fernab jeglicher Zivilisation aufhält, wo die Satellitenkommunikation ihre wesentliche Stärke gegenüber terrestrischen Kommunikationstechnologien ausspielen könnte. Der große LEO-MC Markt befindet sich also eher im direkten Wettbewerb zu existierenden terrestrischen Mobilfunksystemen.

Daneben erfordert die technische Realisierung von MCs auch in entlegenen Gebieten immer eine Verbindung zum Netz am Boden mit einer terrestrischen Netzanbindung. Fehlen diese Bodenrelais, so funktioniert auch die Kommunikation über den MC-Satelliten nicht, obwohl diese dort im Orbit vorhanden ist. Inter-Satellite-Links (ISL) können diese Netzanbindung über Bodenstationen in leichter zugänglichen Gebieten herstellen und sichern die Kommunikation in diesen entlegenen Gebieten.

Als wesentliche Vorteile bei der Vermarktung von NeSC LEO-MC-Systemen gegenüber MEO und GEO werden üblicherweise folgende Punkte genannt:

- Höhere Datenraten als bei bisherigen Satellitenkommunikationssystemen.
- Kostenvorteile beim Einsatz von COTS-Systemen → *NewSpace approach*
- Globale Versorgung, damit Anbindung neuer Nutzerschichten ans Internet.
- Hohe Reichweite (long-distance).
- Mit LEO-MCs und HAPS sind geringere Latenzen möglich aufgrund geringerer Distanz gegenüber MEO und GEO.

- Die geringere Distanz bedingt bei LEO und HAP ebenso geringere Sendesignalstärken und Bodenantennengewinn. Damit wird der Einsatz von Standard-Endgeräten mit direkter Satellitenanbindung möglich (5G, 6G).

Neben dem reinen Konsumentenmarkt haben die NewSpace und insbesondere auch die NeSC-Player in den vergangenen Jahren verstärkt staatliche Bedarfsträger als mögliche Kunden identifiziert. Insbesondere das Militär ist bereit, deutlich höhere Summen zur Bereitstellung bestimmter Fähigkeiten zu investieren als private Kunden. NewSpace folgt hier dem klassischen Vorbild des „Old Space“, gilt der Weltraum doch seit eh und je als Dual-Use Domäne.

Marktverzerrend wirkt die behördliche „Querfinanzierung“ von NewSpace-Raketenstarts (derzeit insbesondere in den USA), wodurch dann andere Starts gegenüber der Konkurrenz deutlich günstiger angeboten werden können.

5.2 Herausforderungen beim Betrieb des Space- bzw. Stratosphären-Segments

Eine wesentliche Herausforderung stellt der sichere Flugbetrieb großer Mega-Constellations dar. Führt man sich vor Augen, dass allein die Starlink-Konstellation die Zahl aktiver Satelliten um die Erde im Jahr 2021 in etwa verdoppelt hat, wird schnell klar, dass ein ausgeklügeltes Verkehrsmanagement unter internationaler Abstimmung unerlässlich ist. Mit Einführung der Fließbandfertigung und der Verwendung von COTS-Komponenten sparen viele der NeSC-Player an der Qualitätssicherung ihrer Produkte. Entsprechend höher sind die Ausfallquoten der Satelliten. Etliche Konstellationen insbesondere auf Basis von CubeSats statten ihre Systeme gar nicht mit einem Antriebssystem aus, wodurch Ausweichmanöver unmöglich werden. Dadurch steigt das Kollisionsrisiko aufgrund fehlender Bahnkorrekturmöglichkeiten dramatisch an. Ein weiterer offener Punkt ist die Entsorgung der Satelliten an deren Lebensende. Hier fehlen überzeugende Konzepte, mit denen man die Bahnebenen wieder freigeben kann, insbesondere, wenn man bedenkt, dass Objekte ab einer Orbithöhe von 700 km hunderte bis tausende Jahre brauchen, um wieder zur Erde zurückzukommen, wenn keine aktiven Hilfsmittel wie Antriebe verfügbar sind. Aber selbst im nominellen Fall sind mehrere 100 oder 1000 Satelliten nicht mittels klassischer Raumflug-Ansätze effizient zu betreiben. Hier wird man auf ein hohes Maß an Autonomie und Selbstorganisation im Raumsegment setzen müssen, sowie auf die Verwendung künstlicher Intelligenz und Big-Data-Analytics am Boden. Dabei wird die Vernetzung der einzelnen Satelliten untereinander (ISL) eine entscheidende Rolle spielen, da andernfalls zu viele Bodenkontakte notwendig werden, um ein lückenloses Monitoring der einzelnen Satelliten durchzuführen.

Auch **HAPS** stellen den Flugbetrieb vor neue Herausforderungen, da man diese als eine Mischung aus Flugzeug und Satellit betrachten muss: Hinsichtlich ihres Einsatzes (lange Zeiträume, beyond-line-of-sight Kommandierung und Überwachung mit ausgedehnten Autonomiephasen) passen sie ausgezeichnet in die betrieblichen Konzepte von Raumfahrzeugen. Ihr Umgebungsmedium mit der genauen Bewertung und Vorhersage von Luftströmungen in verschiedenen Flughöhen und die damit verbundenen Flugeigenschaften entsprechen dagegen ganz deutlich denen von Flugzeugen. Ihre Flughöhe trennt sie vom kommerziellen Luftverkehr, dennoch müssen sie bei Start und Landung diesen Bereich durchqueren, auch im Falle von Fehlfunktionen kann dies passieren, und daher müssen entsprechende Sicherheitsmaßnahmen beachtet werden.

Bei **VHTS** im GEO sind Betrieb und Flugführung durch frühere Systeme erprobt und es wird mit keinen neuen Herausforderungen gerechnet.

5.3 Herausforderungen bei den Endnutzerdiensten

Der erwartete Nutzen von NeSC liegt in erster Linie in Kostenvorteilen und der Verbesserung der Serviceabdeckung, sei es im Bereich der hochratigen Kommunikation, des Internet-of-Things oder auch der Erdbeobachtung. NeSC-Systeme (HAPS und LEO) verbinden die Vorteile terrestrischer Netze in Bezug auf Latenz bis zu einem gewissen Grad, während geostationäre Satelliten die Versorgung großer Erdregionen bieten, allerdings bei ungünstiger Signalverzögerung. Eine Kombination von LEO-MCs und HAPS mit MEOs scheint daher vielversprechend, da bis zum MEO die Signalverzögerung nur ein geringes Problem darstellt.

Wünschenswert ist eine direkte Satellitenanbindung von Nutzerterminals (Mobiltelefonen), und vor diesem Hintergrund werden Satelliten-MCs als ideale Ergänzung terrestrischer Mobilfunknetze gesehen. Allerdings werden - aufgrund der Komplexität der notwendigen Signalverarbeitung und Ressourcenzuweisung - in einem 5G Netz Satelliten zunächst die Rolle von Netzknoten zur Weiterleitung von Daten und Informationen mit gewissen Fähigkeiten auf der Übertragungs- und Vermittlungsschicht einnehmen. Gerade in Bezug auf die zahlreichen Interferenzprobleme (Inter-Cell und Intra-Cell Interference, Koexistenz mit anderen Systemen etc.), denen Satelliten aufgrund ihres weiten Field-of-View ausgesetzt sind, ergeben sich limitierende Faktoren für den Datendurchsatz. Hinzu kommen bisweilen starke Beschränkungen für die Sendeleistungen und das Linkbudget, die nicht nur praktische Ursachen haben wie begrenzte Batterieleistungen von Endgeräten, sondern auch regulatorisch begründet sind, da Satellitenservices in vielen Frequenzbereichen nur sekundäre Betriebsrechte haben.

Aus heutiger Sicht sind deshalb vor allem Satellitenverbindungen zwischen Basisstationen (Backhauling) interessant sowie die Nutzung von Satelliten zur Vernetzung von mobilen Plattformen wie Fahrzeugen in den Bereichen Multimedia und IT-Services. Hier können Satelliten einen Beitrag zur medienbruchfreien Versorgung in entlegenen Gebieten sowie zur Entlastung der terrestrischen Netze leisten. Insbesondere in Bezug auf reaktionsschnelle Überbrückungslösungen z.B. im Falle von Umweltkatastrophen sind Backhaul-Satellitenverbindungen ein probates Mittel zur Wiederherstellung der Kommunikationsdienste. Letztlich bieten sich auch neue Möglichkeiten für digitale Mehrwertdienste, die vom terrestrischen Netz entkoppelt werden sollen, beispielsweise aus Gründen der Datensicherheit, der Datenhoheit oder der Serviceautonomie.

5.4 Nicht-terrestrische Netze in 5G und zukünftigen Mobilfunkgenerationen

Die 3GPP²⁶ arbeitet bereits seit 2017 an der Integration von NTN in den 5G Standard. Vor kurzem wurde das 3GPP Release 17 abgeschlossen, das die 5G-Kommunikation über NTN ermöglicht. Dies beinhaltet sowohl die Kommunikation über GEO- und LEO-Satelliten, als auch über HAPS. Der neue Standard erlaubt Satellitenkommunikation mit einem regulären 5G Endgerät oder auch einer separaten Antenne (VSAT, Very-Small-Aperture Terminal) auf Fahrzeugen, wie etwa Autos oder Flugzeugen. Des Weiteren werden auch 4G-basierte IoT Verbindungen via NTN ermöglicht, auf Basis des IoT-Standards NB-IoT und eMTC. Als Architektur wird die sogenannte transparente Architektur unterstützt, das heißt, dass der Satellit lediglich das Signal weiterleitet und keine weitere Verarbeitung auf dem Satelliten stattfindet.

Diese Anbindung von Satelliten an das 3GPP 5G Mobilfunksystem benötigt Anpassungen im Standard. Insbesondere die Kommunikation via LEO-Satelliten stellt einige Herausforderungen, da sich die Satelliten im Vergleich zur Erdoberfläche sehr schnell bewegen. Dies führt beispielsweise zu Verschiebungen im Frequenzbereich, sowie auch für stationäre Nutzer zu regelmäßigen Zellenwechseln im Sekunden- bis Minutentakt. Des Weiteren sind Satellitenzellen deutlich größer als terrestrische Mobilfunkzellen, wodurch mehr Nutzer verbunden sein können und die Zelle sich über mehrere Länder erstrecken kann. Um diese Herausforderungen zu lösen, wurde der Ausgleich der Referenzzeit- und Frequenzverschiebungen seitens des Endgerätes eingeführt, welcher auf Basis der bekannten Satellitenbewegung und der Nutzerposition berechnet wird. Für die Zellenwechsel gibt es weiterhin die Möglichkeit, den Wechsel zur nächsten Satellitenzelle vorab zu konfigurieren („conditional handover“). Außerdem wurden Mechanismen eingeführt, um mit den längeren Signallaufzeiten im Vergleich zum terrestrischen Mobilfunknetz umzugehen. Für die IoT-Endgeräte wurden ebenfalls Lösungen für die spezifischen Probleme gefunden, beispielsweise beim Energieverbrauch oder aufgrund des Halbduplex-Betriebs. Zusammenfassend erlauben all diese Änderungen zusammengenommen eine 5G- bzw. 4G-basierte Kommunikation via Satellit, sowohl für Smartphones als auch IoT-Geräte ohne die Notwendigkeit auf separate Kommunikationssysteme zurückzugreifen. Darüber hinaus gibt es erste Firmen, die weltraumgestützte Lösungen für die mobile Satellitenkommunikation bereitstellen²⁷.

Nachdem das erste NTN-Release (Rel. 17) noch neu ist, lassen Implementierungen und Einsatz noch auf sich warten. Insbesondere gilt es, die Verfügbarkeit von entsprechenden Chipsets und Endgeräten abzuwarten. Gleichzeitig arbeitet die 3GPP bereits an Verbesserungen und Erweiterungen für Release 18, welches Teil von 5G-Advanced ist und frühestens ab Mitte 2024 kommerziell verfügbar sein

²⁶ <https://www.3gpp.org/>, abgerufen 2023/10/22

²⁷ <https://ast-science.com/spacemobile-network/>, abgerufen 2023/10/22

könnte. Dies beinhaltet Themenbereiche wie beispielsweise die Verbesserung der Abdeckung und der Performance sowie Optimierung der Zellenwechsel. Des Weiteren wird untersucht, wie der Übergang von terrestrischen Mobilfunknetzen zu NTN und vice versa optimiert werden kann, um den Nutzern eine optimale Abdeckung und Verbindungsqualität zu bieten. Ein weiteres Thema ist die Verifikation der Position des Endgeräts durch das Netzwerk. Auch wenn viele Probleme bereits gelöst sind, gibt es noch weitere Herausforderungen an denen aktuell noch nicht gearbeitet wird, die aber möglicherweise in Zukunft relevant werden. Dies könnte beispielsweise weitere Architekturoptionen beinhalten, etwa die regenerative Architektur, welche Verarbeitung von Radiosignalen auf dem Satelliten erlaubt oder das Zusammenspiel verschiedener Satellitentypen. Während 6G noch in der Definitionsphase ist, wird die Integration von NTN und terrestrischem Mobilfunknetz als wichtiges Thema in den 6G Diskussionen geführt. Vollständige und nahtlose Integration von terrestrischem und nicht-terrestrischem Mobilfunk bietet die Chance, dem Nutzer ortsunabhängig immer die bestmögliche Konnektivität zu liefern.

5.5 Koexistenz und regulatorische Koordination mit bestehender Infrastruktur

Regulatorische Ansprüche betreffen zumeist die Nutzung des verfügbaren Kommunikations-Frequenzspektrums und damit auch die Interferenz und Koexistenz mit anderen (Mobil)funkdiensten, aber auch die Abgrenzung von NeSC-Systemen untereinander. Die dafür zuständige ITU (International Telecommunication Union) und WRC (World Radiocommunications Conference) identifizieren erforderliches Frequenzspektrum und stimmen auf globaler Ebene die Frequenzkoordinierung, Kompatibilität und Interferenzvermeidung ab. Aspekte sind z.B. die Maskierung von GEO-Satellitensignalen durch LEO-MC Signale. Hier muss ein Abschalten konkurrierender Signale gewährleistet werden. Dies treibt den Preis der LEO-MCs massiv, da weitere Satelliten erforderlich sind.

Mit der Integration terrestrischer Dienste und Satellitendienste sowie bedingt durch den enormen Bedarf der 5G Community an Frequenzspektrum ist der Druck auf die Satellitenbetreiber jedoch gestiegen, ihre exklusiven Frequenzrechte aufzulösen und das Frequenzspektrum als shared Medium zu begreifen. Die prominentesten Beispiele hierfür sind der Verlust von C-Band sowie des unteren und oberen Teils der Ka-Band Frequenzen, der sogar die größten Marktteilnehmer wie Intelsat in den USA finanziell erheblich unter Druck gebracht hat. Frequenzkoordinierung und Interferenzvermeidungs- bzw. -behandlungsstrategien sind daher entscheidend für den zukünftigen Betrieb von Kleinsatellitensystemen und -konstellationen. Hierbei müssen vor allem im kommerziell wichtigen K-Band (Ku, Ka) sowohl feste terrestrische Dienste (Richtfunk) als auch mobile terrestrische Dienste betrachtet werden, welche vielfach Schutzrechte vor Satelliteninterferenz genießen. Gerade die kommerziell entscheidenden mobilen Satellitendienste (im Satellitenbereich meist Bodenstationen und Mobile Plattformen – ESOMPs genannt) sind nach geltendem Recht oft nur sekundäre Dienste, d.h. sie müssen sich den primären terrestrischen Diensten unterordnen und nachweisen, dass die Satellitenemissionen nicht zur Störung des primären Dienstes führen werden. Dies ist ein aufwändiger und teurer Verhandlungsprozess, um den sich eine eigene Dienstleistungsindustrie entwickelt hat. Besonders relevant sind dabei die sog. "inline events", also Situationen, in denen der Satellit direkt in das terrestrische System einstrahlt. Ein Beispiel ist der geostationäre Orbit oder auch der terrestrische Richtfunk. Wenn Satellitenbahnen solche Systeme kreuzen, müssen die Satelliten in der Regel abgeschaltet werden, sodass der Verkehr zuvor an andere Satelliten übergeben werden muss, welche auch vom Boden aus verfügbar sind. Je nach Frequenzbereich und Orbit treiben diese Anforderungen die benötigte Anzahl an Satelliten enorm in die Höhe. Neue technologische Möglichkeiten wie strahlformende Antennen und interferenzabhängige Signalvorkodierung sind dabei wichtige Mittel, die Situation zu entspannen.

Erwähnenswert ist auch, dass der Handel mit Satellitenfrequenzanmeldungen inzwischen einen eigenen volatilen Markt bildet. Heute sind mehr als 50 Satellitenkonstellationen mit mehreren hunderttausend Satelliten bei der ITU angemeldet und je nach Anmeldedatum priorisiert. Auch wenn die meisten davon nur "Papiersatellitensysteme" darstellen, haben neue Marktteilnehmer daher nur geringe Chancen, in technologisch attraktiven Frequenzbereichen noch Platz zu finden. Neue und strengere Regeln für die Inbetriebnahme solcher Konstellationen, insbesondere der Zwang, zukünftig mehr als einen Satelliten im Orbit nachweisen zu müssen, bevor eine Frequenz als in Betrieb genommen gilt, dürften zur Bereinigung dieser Situation beitragen.

5.6 Steigendes Kollisionsrisiko

Die Besetzung wichtiger LEO-Orbithöhen mit vielen kleinen Mega-Constellation-Satelliten, durch verschiedene konkurrierende Player birgt erhebliche Gefahren für die astronautische wie institutionelle Raumfahrt wie auch der Gefährdung der Konstellationen selbst^{28 29 30}. Da die für LEO-MCs eingesetzten Satelliten teils keinen eigenen Antrieb besitzen, oder dieser unzuverlässig ist, können sie drohenden Kollisionen teils nicht aus dem Weg gehen, oder sich selber nach ihrer Lebenszeit „de-orbiten“ (also gezielt selber zum Absturz bringen). Antriebslose Satelliten belasten – je nach Orbithöhe – viele Jahrzehnte die Erdumlaufbahn mit Kollisionsrisiken. Regelmäßig hört man von Beinahe- und seltener auch von kompletten Kollisionen^{31 32}. Die einzelnen Satelliten(teile) können dann zwar durch entsprechende Maßnahmen (Satellite-Tracking per Radar oder Laser) verfolgt werden und damit direkte Kollisionen mit anderen Satelliten derzeit noch größtenteils vermieden werden – aber nur wenn diese anderen Satelliten auch einen funktionierenden eigenen Antrieb besitzen. In der Vergangenheit ist es schon mehrfach zu solchen Kollisionen gekommen. Die dabei entstehenden Trümmerteile sind teils so klein, dass sie nicht mehr vom Boden verfolgt werden können, bzw. diese Trümmer werden so zahlreich, dass ein Ausweichen aufwendig oder unmöglich wird.

Da die Trümmerteile eine hohe Geschwindigkeit haben (~25.000 km/h), hat ein Zusammenstoß auch sehr kleiner Teile (millimetergroß) mit anderen Raumflugkörpern immer Beschädigungen und häufig den Totalausfall zur Folge. Beim Zusammenstoß mit menschlich besetzten Raumfahrzeugen muss mit letalen Folgen gerechnet werden.

Befinden sich unkontrollierbare Trümmerteile im Orbit, ist mit einem exponentiellen Anstieg von weiteren Kollisionsereignissen zu rechnen – ein als „Kessler-Syndrom“ bezeichneter Kaskadeneffekt setzt dann ein³³. Schließlich kann im ungünstigsten Fall eine Blockade vieler Orbitaktivitäten die Folge sein, insbesondere die astronautische Raumfahrt im erdnahen Orbit könnte aufgrund häufiger Kollisionen mit Trümmerteilen zu riskant werden. Dies gilt insbesondere für MCs, da sich die zu besetzenden Orbithöhen oberhalb der aktuellen Raumstationen befinden und damit die „herabfallenden“ Trümmerteile die astronautisch besetzten Umlaufbahnen durchdringen. Eine Lösung dieses Problems wäre es, die MCs nur unterhalb der Orbithöhe von Raumstationen zu erlauben, von wo sie in relativ kurzer Zeit durch atmosphärische Reibung entfernt würden. Da die Satelliten dort aber eine geringere Sichtbarkeit vom Boden hätten und aufgrund ihres kurzen möglichen Aufenthalts von kaum länger als einem Jahr (Reibung an der Atmosphäre), sind diese sehr niedrigen Orbits bei den entsprechenden Betreibern unbeliebt und werden momentan nicht genutzt.

Weiterhin wird dieses Problem durch absichtliche wie versehentliche Erzeugung von Trümmerteilen intensiviert. Das Zerstören feindlicher Spionagesatelliten durch boden- oder orbit-gestützte Antisatellitenwaffen ist gerade für einige Nationen eine militärische Option, die ungeachtet der daraus erwachsenden globalen Probleme verfolgt wird³⁴.

Während das Entfernen kompletter Satelliten durch entsprechende Missionen gerade erprobt wird, ist dies für kleine Trümmerteile aufgrund ihrer Anzahl und schweren Ortbarkeit nicht durchführbar.

Im GEO sind dagegen Kollisionen nicht zu erwarten da die dortigen Satelliten schon seit Jahrzehnten aus dem Orbit zu einem sogenannten „Graveyard-Orbit“ oberhalb des GEO entfernt werden. Ebenso sind sämtliche HAP-Systeme diesbezüglich unkritisch.

Sollte es durch die LEO-MCs im erdnahen Orbit zu ungewollten Kollisionen kommen oder die militärische Anwendung von Antisatellitenwaffen zunehmen, so werden LEO-Raumfahrtanwendungen über viele Jahre beeinträchtigt – dann können nur HAPS, MEO- und GEO-Systeme einen adäquaten Ersatz bieten. Insbesondere Orbithöhen deutlich über 1000 km erscheinen daher attraktiv, da hier weniger Satelliten dieselbe Flächenabdeckung bieten wie niedrig fliegende dichtere Konstellationen, und damit die Kollisionswahrscheinlichkeit geringer ist. HAPS hingegen können durch ihre geringe Höhe zwar weniger Bodenfläche abdecken, aber durch die geringe Distanz ein günstigeres Kommunikationsbudget anbieten neben sehr kurzen Signalverzögerungen.

28 Wikipedia-Artikel <https://de.wikipedia.org/wiki/Weltraummüll>, abgerufen 2023/10/22

29 Aaron C. Boley and Michael Byers, "Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth", *Scientific Reports* (2021) 11:10642 nature portfolio

30 <https://www.heise.de/news/Satelliten-Bereits-drastisch-mehr-Beinahe-Kollisionen-wegen-Starlink-6171314.html>, abgerufen 2023/10/22

31 <https://www.heise.de/news/Beinah-Kollision-im-Orbit-Zwei-Satelliten-wenige-Meter-aneinander-vorbei-gerast-7475017.html>, abgerufen 2023/10/22

32 <https://www.scinexx.de/dossier/weltraumschrott-alarm-im-orbit/>, abgerufen 2023/10/22

33 Donald J. Kessler, Burton G. Cour-Palais: „Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt.“ In: *Journal of Geophysical Research*, Band 83, Nr. A6, 1978

34 <https://www.heise.de/hintergrund/Grossmaechte-nehmen-Satelliten-als-Angriffsziele-ins-Visier-7153644.html>, abgerufen 2023/10/22

6. Handlungsempfehlungen für Forschung, Entwicklung, und Realisierung

Aspekte von NeSC zusammengefasst:

- Unter NeSC werden derzeit hauptsächlich verschiedene Satelliten-Mega-Konstellationen im niedrigen Erdorbit gesehen, die jeweils aus tausenden kleiner und kostengünstiger Satelliten bestehen. Erst an zweiter Stelle kommen GEO- und MEO-Systeme. HAPS befinden sich noch in der Entwicklung. Die Kombination verschiedener Orbits bietet Vorteile bez. Flexibilität und Nutzung der Orbits sowie einer verbesserten Resilienz des Kommunikationssystems.
- Die laufenden Entwicklungen im Bereich LEO-MCs durch amerikanische und asiatische Player dürften durch deutsche oder auch europäische Aktivitäten unter den derzeitigen Bedingungen und dem Zugang zu Kapital nur schwer einholbar sein.
- Anbieter hauptsächlich aus den USA planen und starten derzeit zehntausende von Satelliten, um einen erwarteten globalen Milliardenmarkt mit Kommunikations- und Mehrwertdiensten zu adressieren. Neben der großen Zahl an LEO-Satelliten mit geringem Gewicht und Industrieprozess-orientierter Fertigung ist es der Ansatz kostengünstiger und wiederverwendbarer Raketenstufen, welcher einen fundamentalen Paradigmen-Wechsel in der Raumfahrt eingeläutet hat. Startkosten von LEO-Satelliten sollen dazu bis um einen Faktor 100 bis zum Jahr 2030 reduziert werden.
- NeSC unterstützt neue Formen der mobilen Kommunikation (autonomes Fahren, schnelle Datenanbindung – ohne Abhängigkeit von lokalen Gegebenheiten wie der Verfügbarkeit einer terrestrischen Infrastruktur, Anbindung von Komponenten des IoT, ...), und als Redundanz zu terrestrischen Systemen. Dies führt zu weiteren gesellschaftlichen Veränderungen, z.B. in dünn besiedelten Gebieten Steuerung von Verkehrsflüssen, ggf. Verringerung von Verkehrsemissionen durch reduzierten Pendlerverkehr, verstärkte Nutzung von Home-Office und insbesondere sichere Kommunikation auch in Krisensituationen wie Naturkatastrophen, Sabotage, und militärischen Auseinandersetzungen.
- Aber auch Abhängigkeit und Einschränkungen von diesen neuen Systemen bis hin zur politischen und militärischen Einflussnahme, und noch genauerem Verfolgen des einzelnen Nutzers durch die private Industrie sind zu beachten, wenn es keine entsprechende Regulierung zur Vermeidung von Missbrauch gibt: Wenn ein NeSC-System den einzigen Kommunikationsweg darstellt, ist dessen politische und gesellschaftliche, sogar militärische, Einflussnahme zu beobachten. Die Kontrolle über das Internet durch die NeSC-Betreiber kann so zur Abhängigkeit und Verzerrung der freien Meinung führen.
- Zulassungsprobleme mit Regierungen beim Einsatz von Satelliten-NeSC in restriktiven Ländern, und die Problematik der globalen Frequenznutzung können für NeSC-Betreiber problematisch werden. Hier ist wegen des grundsätzlich globalen Charakters von Satellitensystemen eine Regulierung über regionale und internationale Institutionen wie die ITU zur Koordinierung sinnvoll. Dabei ist die knappe Ressource der Orbits ein komplexes Thema, das Deutschland und Europa adressieren sollten.
- Die Erzeugung von gefährlichem Trümmern im Weltraum in kritischen Orbithöhen durch möglich Kollisionen von NeSC-Satelliten oder gezielten Abschuss von Satelliten kann kurzfristig zu einer globalen Blockade des Zugangs zum Weltraum führen.

Empfehlungen:

- Eine ausschließliche Abhängigkeit Deutschlands und Europas bei NeSC-Lösungen von nicht-europäischen Anbietern gilt es zu vermeiden unter Gesichtspunkten von Zuverlässigkeit, Datensicherheit, und politischer Unabhängigkeit. Wegen der angestrebten technologischen Souveränität muss für Europa eine alternative und zuverlässige Datenanbindung über eine Satellitenkonstellation erreicht werden, für die Gesellschaft und Industrie wie insbesondere auch für Organisationen mit Sicherheitsaufgaben und deren Bedarf an resilienten Kommunikationsnetzen.
- In diesem Zusammenhang kommt der bereits gestarteten EU-Initiative „IRIS2“ für Satellitenkonnektivität große Bedeutung zu^{35 36 37 38}. Die Zielsetzungen des multi-orbitalen IRIS2 Projekts beinhalten die Nutzung europäischer Stärken, Integration militärischer Anforderungen, Nutzung und Erweiterung der Fähigkeiten des EU-Raumfahrtprogramms, Komponentenverfügbarkeit sowie der Ermöglichung von nicht kommunikationsbezogenen Nutzlasten. Hierbei sollten die Erfahrungen aus früheren Konstellationen genutzt werden, wie optimierte Orbithöhen, oder Vermeidung von einer zu großen Anzahl von Satelliten und damit Verringerung des Kollisionsrisikos.
- Der Fokus der europäischen Anstrengungen sollte auch über IRIS2 hinaus insbesondere auf Bereiche gelegt werden, in denen die deutsche und europäische Forschungs- und Entwicklungslandschaft konkurrenzfähig ist. Hier bieten sich Möglichkeiten speziell für HAPS, MEO-Systeme wie auch GEO-VHTS und in der Vernetzung von LEO- mit MEO-Systemen und GEO-VHTS.
- Die HAPS- und GEO-basierten Plattformlösungen decken gezielt lokale beziehungsweise weitflächige Gebiete ab, in denen ihr Service benötigt wird. Durch die Kombination HAPS, MEO und GEO-VHTS kann eine höhere Nutzerdichte und damit auch Profitabilität erzielt werden als durch eine reine LEO-MC. Weitere Vorteile von nicht rein LEO-basierten Lösungen wären eine verbesserte Resilienz, die Reduzierung des Kollisionsrisikos von LEO-MC-Satelliten und eine geringere Anzahl von Satelliten. Im MEO (oberhalb ~1000 km Orbithöhe) ist eine geringere Satellitenanzahl für globale Sichtbarkeit erforderlich, damit besteht auch eine geringere Gefahr von Kollisionen. Zudem wären von Trümmerteilen nicht direkt die astronautische Raumfahrt und die Erdbeobachtungssatelliten im LEO betroffen. Deutschland sollte daher unbedingt auch MEOs und HAPS fördern, um einen Ausfall der LEO-MCs schnell kompensieren zu können.
- Als Backup/Redundanz funktionieren NeSC-Systeme auch bei Ausfall der terrestrischen Netze wie zum Beispiel im Falle eines Blackout, der den Zugang der öffentlichen Fest- und Mobilfunknetze lahmlegt³⁹. Hier ist jedoch vorauszusetzen, dass die Bodenstationen eine autarke Stromversorgung haben oder in Gebieten außerhalb des Blackouts liegen. Unglücksfälle der jüngsten Vergangenheit wie Überschwemmungen geben einen Hinweis, wofür die Kommunikationsnetze gewappnet sein müssen.
- Mit Hilfe von HAPS-Plattformen kann ein lokaler Bedarf kurzfristig gedeckt werden, was mit Satellitensystemen nicht möglich ist. Daher muss auch diese Technologie in Europa weiter gefördert werden.
- Europa muss die Frequenzuteilung für Kommunikations-Satellitensysteme koordinieren und Einfluss auf globale Systeme nehmen. Zudem sollte die Frequenzvergabe für Satelliten verbunden sein mit der Verpflichtung zu gesichertem De-Orbiting. Europa sollte dies über die ITU für alle Konstellationen fordern.
- Unerlässlich für eine nachhaltige Nutzung des Weltraums ist die verbindliche Abstimmung eines umfassenden Space Traffic Managements zur Steuerung der Satelliten auf internationaler Ebene. NeSC-Player werden aktuell nicht in die Pflicht genommen, für die Sicherheit und die Entsorgung ihrer weltraumgestützten Infrastrukturen zu sorgen bzw. Verantwortung für die Folgen ihres Handelns zu übernehmen.

35 https://germany.representation.ec.europa.eu/news/sicherer-und-schneller-internetzugang-durch-satelliten-und-nachhaltige-nutzung-des-weltraums-eu-2022-02-15_de, abgerufen 2023/10/22

36 https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2023-04/IRIS2%20factsheet%20-%20DE_0.pdf, abgerufen 2023/10/22

37 <https://bdi.eu/themenfelder/sicherheit/newspace-initiative/>, abgerufen 2023/10/22

38 <https://www.heise.de/news/EU-beschliesst-eigenes-Satellitensystem-fuer-sicheres-Internet-7343959.html>, abgerufen 2023/10/22

39 ITG-Veröffentlichung zu „Resiliente Infrastruktur“

- Von großer Bedeutung erscheinen Optionen der Technologieführerschaft mit europäischen oder deutschen LEO/MEO-Systemen (oder auch stratosphärischen Plattformlösungen), die in Mobilfunknetze der fünften und sechsten Generation eingebunden werden. Die 5G Standardisierungsaktivitäten für nicht-terrestrische Netze scheinen auf einem guten Weg (3GPP Rel. 17). Es gilt, den Einsatz von 5G/6G Endgeräten und Sensoren sowohl mit terrestrischen als auch nicht-terrestrischen Kommunikationsnetzen mit den dazugehörigen Kostenvorteilen eines bestehenden globalen Ökosystems zu nutzen. Ziel muss es sein, die unterschiedlichen Stärken und Schwächen von terrestrischen und Satellitensystemen komplementär zu ergänzen – „Kooperation anstatt Konkurrenz“.

Danksagung:

Die Autoren bedanken sich bei allen Kolleginnen und Kollegen für viele interessante wie auch kontroverse Diskussionen zum Thema NeSC. Insbesondere möchten wir Gerhard Bauch, Armin Dekorsy, Jörg-Peter Elbers, Federico Glazzer, Andre Grabs, Albert Heuberger, Andreas Kirstädter, Kevin Li, Klaus Schönherr, Hans Schotten, Kevin Shortt, Rainer Wansch, Phillip Wertz und Volker Ziegler danken für Kommentare, Korrekturen, und Anregungen.

Abkürzungen

BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (Polizei, Feuerwehr, THW, Teile der Bundeswehr)
COTS	Commercial Of The Shelf
eMTC	enhanced Machine Type Communication
F&E	Forschung und Entwicklung
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
GEO	Geostationary Earth Orbit
HAPS	High-Altitude Platform System
IoT	Internet of Things
ISL	Inter-Satellite Link, meist optisch → OISL
LEO	Low Earth Orbit
LPWAN	Low-Power Wide-Area Networks
MC	(LEO Satellite-) Mega Constellation
MEO	Medium Earth Orbit
MIoTY	Produktbezeichnung für einen IoT-Übertragungsstandard, auch als „Telegram Splitting Ultra Narrowband (TS-UNB)“ bezeichnet
NB-IoT	Narrowband Internet-of-Things
NeSC	NewSpace Communications
NTN	non-terrestrial networks
TDMA	Time-Division Multiple Access
UCSS	Unipolar-Coded Chirp Spread Spectrum – energieeffiziente Übertragungstechnik
ULA	United Launch Alliance
VDE-ITG	Verband der Elektrotechnik ... – Informationstechnische Gesellschaft
VHTS	Very High Throughput Satellite (System), meist im GEO
3GPP	3rd Generation Partnership Project – Standardisierungsorgan für Mobilfunk
5G/6G	5 th /6 th Generation mobile Communications standards

Über die Informationstechnische Gesellschaft im VDE (VDE ITG)

Die Informationstechnische Gesellschaft im VDE (VDE ITG) ist die nationale Vereinigung aller auf dem Gebiet der Informationstechnik Tätigen in Wirtschaft, Verwaltung, Lehre sowie Forschung und Wissenschaft. Ihre Ziele sind Förderung der wissenschaftlichen und technischen Weiterentwicklung und Bewertung der Informationstechnik in Theorie und Praxis. 1954 als Nachrichtentechnische Gesellschaft gegründet, ist sie die älteste Fachgesellschaft im VDE. Die neun Fachbereiche, denen über 80 Fachgremien zugeordnet sind, decken das gesamte Spektrum der Informationstechnik ab. Etwa 10.000 VDE Mitglieder haben sich der ITG zugeordnet und über 1.000 Expert*innen arbeiten ehrenamtlich in den Gremien mit.

Mehr Informationen unter <https://www.vde.com/de/itg>

Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 130 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit mehr als 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. Im VDE Netzwerk engagieren sich über 2.000 Mitarbeiter*innen an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Expert*innen und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch.

Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Sitz des VDE (VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V.) ist Frankfurt am Main. Mehr Informationen unter www.vde.com

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-0
service@vde.com

VDE