Mobilfunk und Internet per Satellit – Der Strahlungsgrill von oben?

Elon Musk ist nicht nur Chef des bekannten Elektro-Automobil-Herstellers Tesla, sondern erfolgreicher „Multiunternehmer“ und u.a. auch Gründer des Raumfahrtunternehmens „SpaceX“. SpaceX hat sich mittlerweile als das führende kommerzielle Unternehmen für Raketenstarts etabliert, vor allem für den Transport von Satelliten in die Erdumlaufbahn. Was liegt da näher, als gleich auch noch ein erdumspannendes Satellitennetzwerk für globalen Mobilfunk im Orbit zu installieren, genannt „Starlink“?

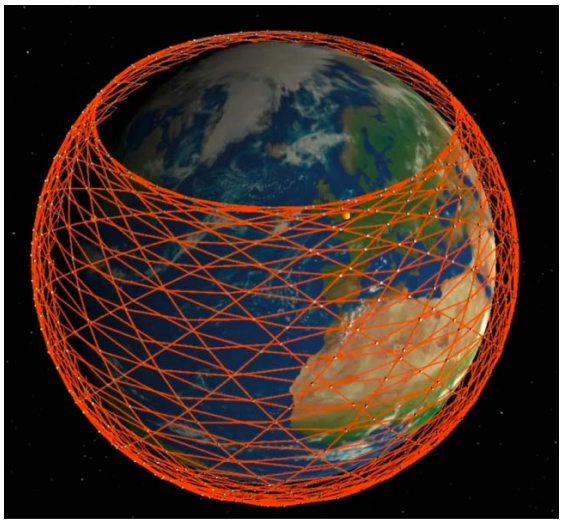

Abb. 1: Computeranimation des Starlink-Netzwerks, [1]

Wie alles, was Elon Musk anpackt, wird auch Starlink äußerst publikumswirksam vermarktet und ist immer für Aufsehen erregende Schlagzeilen gut. Starlink soll den Globus zunächst mit 12.000 bis 14.000 LEO-Mobilfunk-Satelliten (**L**ow **E**arth **O**rbit) abdecken. Damit ist Starlink bereits der größte kommerzielle Satellitenbetreiber. Darüber hinaus sollen Anträge für zusätzliche ca. 30.000 Satelliten geplant sein.

Mit jedem Start einer Falcon 9 Rakete von SpaceX werden 60 Starlink-Satelliten in die Erdumlaufbahn befördert. Starship, der größere Nachfolger der Rakete Falcon 9, soll mit jedem Flug gleich 400 Starlink-Satelliten in‘s Orbit bringen.

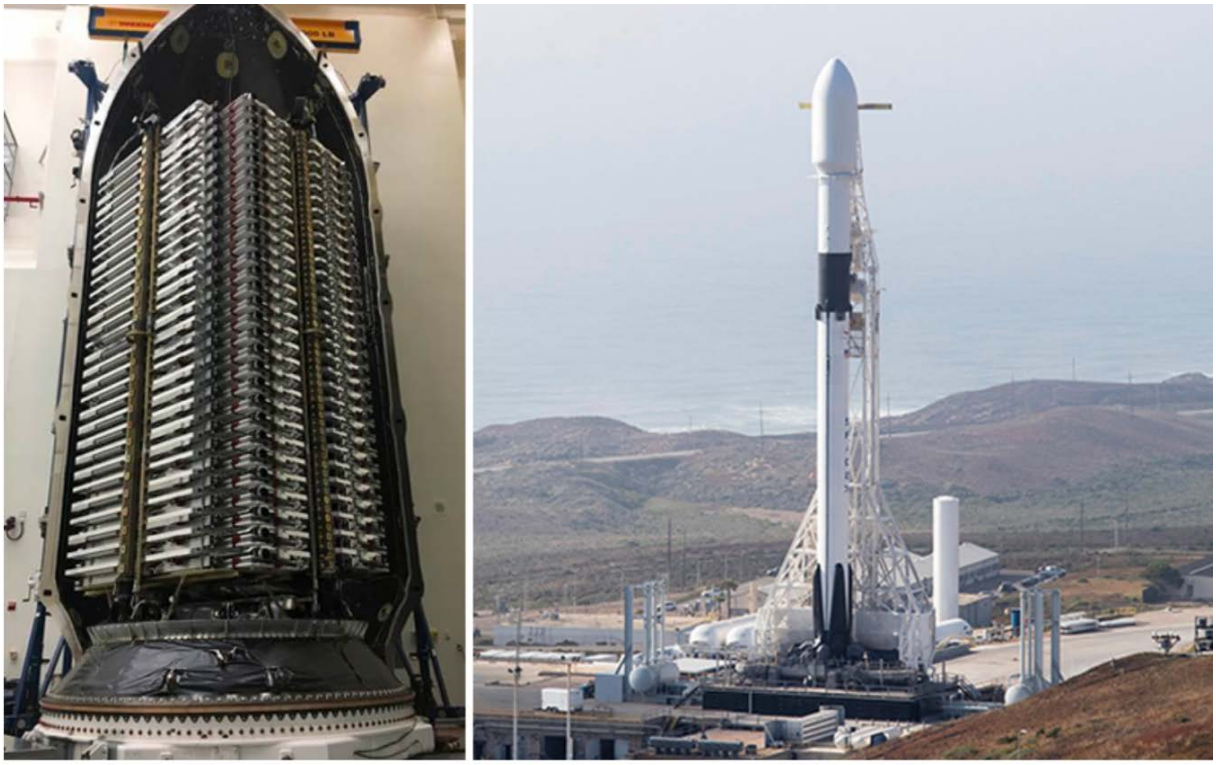

Image credit: SpaceX/Elon Musk

Abb. 2: SpaceX-Rakete Falcon 9 mit zwei Stapeln zu je 30 Starlink-Satelliten [2]

Abb. 3: Ein Start von Starlink-Satelliten (Bild: SpaceX, zitiert in [3])

Abb. 4: Die beiden Stapel Starlink-Satelliten, bereit zum Aussetzen im Orbit (Bild: SpaceX, zitiert in [4])

Abb. 5: Starlink-Satelliten auf der Erdumlaufbahn [5]. Ihre Silhouette erinnert stark an den Monolithen in Stanley Kubrick's legendärem Science-Fiction-Film „2001: Odyssee im Weltraum" aus dem Jahr 1968.

Aufgrund ihrer Umlaufbahn im niedrigsten Satelliten-Orbit (LEO) bewegen sich die Satelliten mit relativ hoher Geschwindigkeit, so dass die „Sichtbarkeitsdauer“ eines einzelnen Satelliten auf der Erdoberfläche sehr kurz ist. Daher ist ca. alle 15 Minuten ein Handover zu einem nachfolgenden Satelliten erforderlich. Dies bedeutet einen erheblichen Steuerungs- und Verwaltungsaufwand für das Satellitensystem.

Ein Video mit anschaulichen Animationen zu Starlink ist unter [1] zu finden, weitere Details z.B. unter [6], [7] und [8].

Der rasante Zuwachs der Satellitenstarts durch Starlink ist aus der Graphik in Abb. 6 ersichtlich.

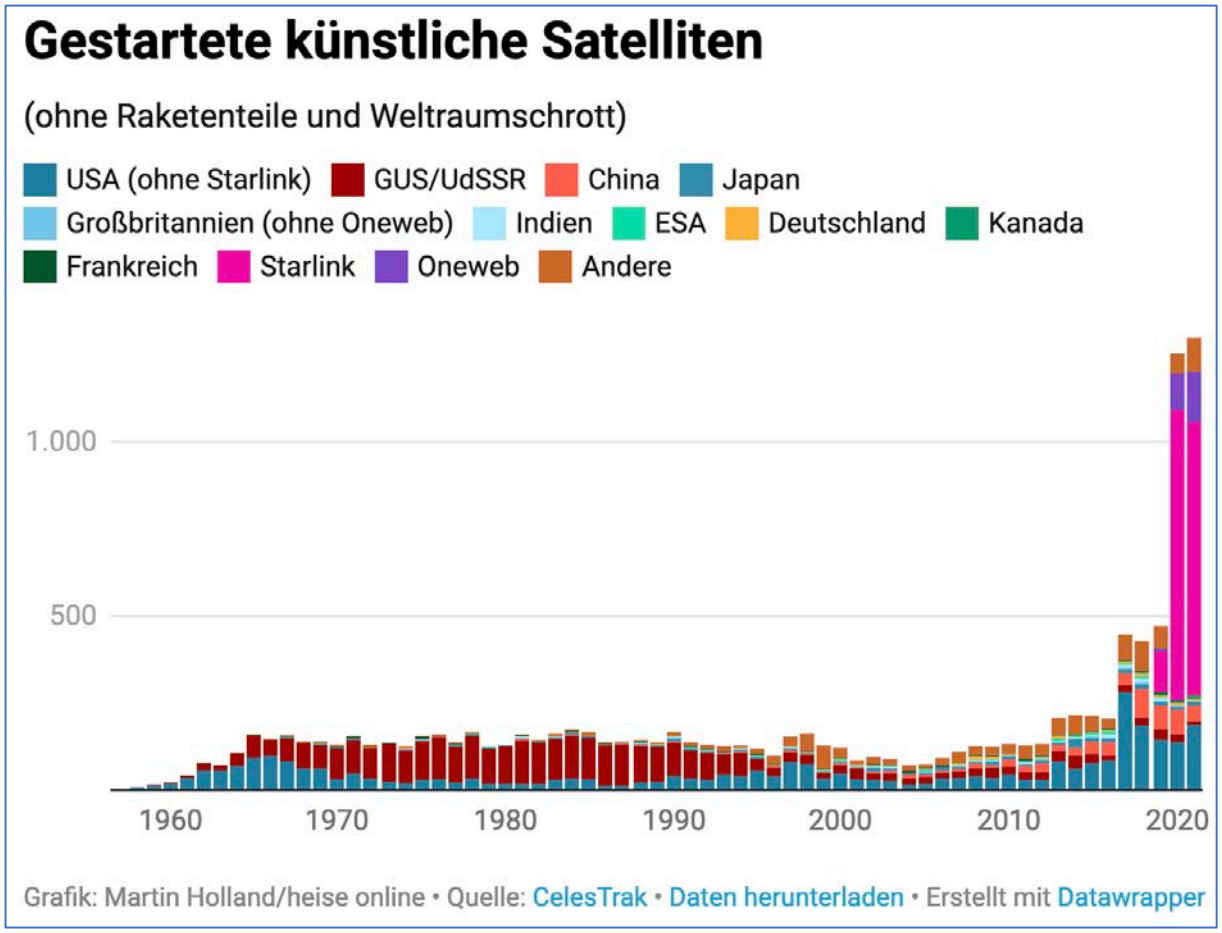

Abb. 6: Gestartete künstliche Satelliten von 1960 bis 2020 [9] und [10]

Allgemeine Kritik an Starlink

Die enorme Zahl von LEO-Satelliten auf relativ niedrigen Umlaufbahnen, wie sie in solchen Projekten wie Starlink eingesetzt werden, hat zu einer Reihe von Kritikpunkten und Besorgnissen geführt.

Lichterketten am Nachthimmel

Obwohl sie relativ klein sind, können die Starlink-Satelliten häufig von der Erdoberfläche aus mit bloßem Auge beobachtet werden (Abb. 7, [4] und gut verständliches Erklärungsvideo [11]). Es gibt Befürchtungen, dass bei der geplanten enorm großen Zahl von LEO-Satelliten der Sternenhimmel überstrahlt werden könnte ([12], [13]). Als Reaktion hierauf sollen die künftigen Starlink-Satelliten mit einer dunklen Oberfläche versehen werden („Darksat“, [14]).

Sorge um Störungen von optischer und Radioastronomie

„Angesichts der geplanten Konstellationen aus Tausenden Satelliten sorgen sich auch Radioastronomen um ihre Forschung. Abhilfe sei aber möglich.

Abb. 7: Mit bloßem Auge sichtbare Lichterkette von Starlink-Satelliten über einer deutschen Stadt [11]

Starlink & Co. sorgen nicht mehr nur in der optischen Astronomie und unter Sternenguckern für Unruhe, auch Radioastronomen fürchten Einschränkungen. Eine für das geplante riesige Radioteleskop SKA erstellte Studie kommt nun zu dem Schluss, dass allein das Netz von SpaceX auf die geplante Forschungsarbeit erhebliche Auswirkungen haben könnte. Signifikant größere Konstellationen könnten bestimmte Beobachtungen komplett unmöglich machen, schreiben sie weiter. Betroffen ist demnach ein Bereich eines Frequenzbands, das zwar auf dem Boden explizit geschützt sei, aber nicht im All.

SpaceX hat im Frühjahr 2019 begonnen, ein Satellitennetz aufzubauen, das auch abgelegene Regionen auf der Erde mit einem preisgünstigen Internetzugang versorgen soll. Starlink soll eine komplette Netzstruktur im Weltraum nachbilden, andere Konzerne wollen nachziehen, etwa Amazon mit dem Project Kuiper. Sie setzen dafür auf jeweils Tausende Satelliten, allein SpaceX hat Genehmigungen (aus den USA) für fast 12.000 Satelliten. Nachdem die Spuren der ersten Exemplare aber bereits astronomische Aufnahmen unbrauchbar gemacht hatten, hatten Astronomen Alarm geschlagen. SpaceX war auf die Kritik eingegangen und hatte die Satelliten weniger stark reflektierend gemacht. („Darksat“ [14])

Mit den Betreibern des geplanten Riesenteleskops SKA (Square Kilometre Array) warnen nun auch Radioastronomen, dass ihre Arbeit durch die Satellitennetze beeinträchtigt werden könnte. Sie formulieren aber auch Maßnahmen, durch die diese Auswirkungen drastisch reduziert werden könnten. Betroffen ist demnach das sogenannte 5b-Frequenzband zwischen 8,3 und 15,4 GHz, in dem nicht nur die Radioantennen lauschen, sondern auch die Satelliten Daten zur Erde funken. Sollten die Betreiber hier nicht nacharbeiten, wäre ‚wahrscheinlich‘ das gesamte Band betroffen: Bei den anfangs geplanten etwa 6400 Satelliten müssten Beobachtungen hier etwa 70 Prozent länger dauern, heißt es. Bei 100.000 Satelliten wäre das Frequenzband nicht mehr erforschbar.

Riesiges Teleskop auf mehreren Kontinenten

Das Square Kilometre Array ist ein geplanter Teleskopverbund, der einmal zur größten Wissenschaftseinrichtung der Welt wachsen soll. Hunderte Parabolspiegel und tausende Einzelantennen sollen den Planungen zufolge über hunderte Kilometer in Australien und Südafrika errichtet und zusammengeschaltet werden. Mit der deutlich besseren Auflösung soll nach Signalen gefahndet werden, die in der Anfangszeit des Universums ihren Ursprung haben. Weiterhin soll grundlegenden Fragen der Astrophysik etwa zur Relativitätstheorie, der Dunklen Materie, der Dunklen Energie und möglichem außerirdischen Leben nachgegangen werden. In Südafrika ist das Gebiet des geplanten Teleskops eine Schutzzone funktechnischer Anlagen (RQZ), in der strenge Regeln das Funkspektrum vor Störungen schützen.

Wie die Betreiber nun erklären, finden sich in dem betroffenen Frequenzband unter anderem die Spektrallinien ‚komplexer präbiotischer Moleküle'. Auf der Suche nach außerirdischem Leben würde man unter anderem genau danach suchen. Bei mehreren Tausend Satelliten müsste man dann aber immer länger beobachten, um die Störungen auszugleichen. Irgendwann sei das aber nicht mehr möglich. Schon das würde die Forschung aber behindern, denn es bliebe weniger Zeit für andere Beobachtungsziele.

Betreiber wie SpaceX könnten das Problem aber verringern, indem sie die Satelliten anweisen, Gegenden wie die um das SKA nicht anzufunken. Dafür bestehe sowieso kein Anreiz, da es dort aufgrund der Regelungen keine Bodeninfrastruktur geben dürfe, so die Betreiber. Insgesamt könnten die Einschränkungen damit um den Faktor 10 verringert werden, anfangs müssten die Beobachtungen also jeweils nur um etwa 7 Prozent ausgedehnt werden.

Die Betreiber des SKA geben sich optimistisch, dass sie im Dialog mit SpaceX & Co. Lösungen finden werden. Gleichzeitig weisen sie auf weitere Analysen hin, die sich aktuell anderen möglichen Problemen widmen, beispielsweise den Reflexionen von irdischen Signalen an den Satelliten, wie sie auch der optischen Astronomie Sorgen bereiten." [15], weitere Informationen siehe auch [16]

<u>Weltraumschrott am „Lebensende" der Satelliten</u>

Da die LEO-Starlink-Satelliten – verglichen mit den auf hohe Lebensdauer ausgelegten „großen" geostationären (GEO) Satelliten im höchsten Orbit – eine bedeutend kürzere Lebensdauer haben, spielt auch die Frage der „Entsorgung" und des „Weltraummülls" eine große Rolle [17].

GEO-Satelliten z.B. werden am Ende ihrer „Lebenszeit" auf dem eigens hierfür geschaffenen „Graveyard Orbit" oberhalb des geostationären Orbits nicht tiefer, sondern „höher gelegt" und warten dort auf das Ende der Zeit – für dieses letzte Manöver müssen entsprechende Treibstoffreserven vorgehalten werden. Bei den LEO-Starlink-Satelliten bleibt dagegen nur der „Weg nach unten"; sie erwartet die Feuerbestattung durch Verglühen im Krematorium der Erdatmosphäre.

Um sicherzustellen, dass die Starlink-Satelliten nach ihrem „Lebensende" auch tatsächlich auf die Erde zurückstürzen und nicht noch lange als „Leichen" im Orbit verbleiben, wurden die Umlaufbahnen statt von der ursprünglich geplanten Höhe über 1.100 km drastisch auf ca. 570 km verringert [18].

<u>Beinahe-Kollisionen mit Satelliten</u>

„Wenn sich zwei Satelliten im Orbit näher als einen Kilometer kommen, zählt das als Beinahezusammenstoß. Deren Zahl hat sich seit dem Starlink-Aufbau verdoppelt.

Die Starlink-Satelliten von SpaceX sind bereits an rund 50 Prozent der Beinahezusammenstöße (‚close encounter') im Erdorbit beteiligt. Das berichtet das US-Magazin Space unter Berufung auf einen Experten der Universität Southampton. Anhand öffentlich einsehbarer Daten zu den Satellitenbahnen hat Hugh Lewis demnach errechnet, dass es pro Woche bereits deutlich über 3000 solcher Ereignisse gibt. Die sind demnach definiert als Passagen von Satelliten in weniger als einem Kilometer Entfernung voneinander. An etwa der Hälfte davon sei ein SpaceX-Satellit beteiligt, hat der Chef der Astronautics Research Group der britischen Universität errechnet. Und es werde zwangsläufig mehr werden. Da die Kollisionsvermeidung noch viel Handarbeit erfordere, wachse die Gefahr dabei immens.

Lewis bezieht sich demnach auf eine Datenbank des US-Katalogs CelesTrak zu solchen potenziell gefährlichen engen Bahnen zweier Satelliten aneinander vorbei. Zwar klingt eine Distanz von einem Kilometer nicht unbedingt nach einem drohenden Zusammenstoß, aber die Ungenauigkeiten zu den Bahnen der Satelliten sind enorm – die tatsächlichen Bahnen können um bis zu 100 Meter abweichen, heißt es noch. Laut Lewis hat die Zahl solcher Beinahezusammenstöße seit dem Beginn des Aufbaus von Starlink deutlich zugenommen und ohne das Projekt wäre das Wachstum nur marginal. Insgesamt geht er davon aus, dass SpaceX-Satelliten nach Abschluss der ersten Aufbauphase von Starlink an 90 Prozent solcher Beinahe-Kollisionen beteiligt sein werden.

Die Zahlen von Lewis dürften die Kritik an den Mega-Konstellationen weiter befeuern. Immerhin plant nicht nur SpaceX, Tausende Satelliten für eine Internetanbindung ins All zu bringen. Insgesamt sind

mehrere Zehntausend Satelliten angekündigt. Dabei hatte die Europäische Weltraumagentur die Entwicklung in der Erdumlaufbahn erst vor wenigen Wochen als untragbar bezeichnet und vor den Gefahren gewarnt. Schon eine einzelne Kollision könnte dramatische Konsequenzen haben, weil dabei viele Trümmer entstehen und eine nicht aufzuhaltende Kettenreaktion auslösen könnten. Lewis ergänzt noch, dass SpaceX erst seit zwei Jahren überhaupt als Satellitenbetreiber agiere und bereits der weltgrößte ist, dabei gebe es ‚ein gewisses Maß an Unerfahrenheit'. Erst im Frühjahr hatte es laute Kritik am Umgang des US-Unternehmens mit einer Beinahe-Kollision gegeben." [3]

Diese Thematik wird auch in dem Youtube-Video „The Space Debris Problem" (englisch) erörtert [19].

Hochfrequenz-Strahlung von Kommunikations-Satelliten

Ein zentraler Aspekt der Besorgnis sind aber vielfach die Immissionen der von den Satelliten abgestrahlten hochfrequenten elektromagnetischen Wellen. Hier sind Befürchtungen zu hören bzw. im Internet zu lesen wie: „Wir werden durch die Satellitenstrahlung – insbesondere durch Starlink – von oben gegrillt!"

Das gibt es schon lange: Telefon und Internet per Satellit

Bereits seit etlichen Jahren oder gar seit Jahrzehnten gibt es über 30 Anbieter von Telekommunikationsdiensten per Satellit (siehe [20]). Etablierte Systeme sind beispielsweise

- Inmarsat: 2 GEO-Satelliten, seit 1983 [21],
- Iridium: 66 LEO-Satelliten in 780 km Höhe. Nach Aufnahme des Betriebes im September 1998 stand Iridium im März 2000 vor dem wirtschaftlichen Aus; im März 2001 wurde der kommerzielle Betrieb fortgesetzt [22],
- Thuraya GEO (Thuraya Satellite Telecommunications Company): 3 geostationäre Satelliten. "*Die Antenne hat einen Durchmesser von 12 Metern. Durch die Größe der Antenne und eine starke Sendeleistung sowie eine hohe Empfangsempfindlichkeit können die Handys relativ klein sein. Eine Richtantenne mit geringem Öffnungswinkel wie im Inmarsat-Netz ist nicht nötig. Die Antenne muss lediglich in Richtung des Satelliten ausgerichtet werden.*" [23]
- skyDSL seit 1999 [24],
- STARDSL [25].

Während Inmarsat, Iridium und Thuraya (nahezu) global verfügbar sind, stellen skyDSL und STARDSL auf Deutschland begrenzt eine Alternative für die Internet-Versorgung dar, wenn keine zufriedenstellende terrestrische DSL-Infrastruktur per VDSL/IP, Glasfaser oder Mobilfunk vorhanden ist. In Österreich und über 60 weiteren Ländern steht entsprechend SOSAT dsDSL in mehreren Varianten für verschiedene Anwendergruppen zur Verfügung [26].

In Planung bzw. in der Erprobung sind etliche weitere Satellitensysteme, hier einige Beispiele:

O3B O3B Networks (SES):	Soll 3 Milliarden Menschen in strukturschwachen Gebieten der Erde in Äquatornähe Internetzugriff und Telekommunikationsdienste bieten. Es handelt sich um MEO-Satelliten (**M**edium **E**arth **O**rbit) in 7.825 km Höhe. Der Start der ersten 4 Satelliten fand 2013 statt, gefolgt von vier weiteren Starts mit je vier Satelliten im Zeitraum 2014 - 2019. Die zweite Satellitengeneration des Typs „O3B mPower" soll ab 2021 in 7er-Gruppen „gelauncht" werden.
TELESAT Telesat LEO	LeoVantage Ein erster Test-Satellit wurde 2018 gestartet, Orbit in ca. 1.000 km Höhe. Für den Endausbau sind 292 LEO-Satelliten geplant, möglicherweise auch 512.
BOEING	V-Band Konstellation: Geplant sind 1.396 bis 2.956 LEO-Satelliten.

OneWeb satellite constellation: Ursprünglich waren 882 Satelliten geplant, deren Anzahl wurde aus finanziellen Gründen aber auf 600 reduziert. Die ersten 6 Testsatelliten wurden 2019 gestartet, weitere 68 Anfang 2020 (Orbit in 1.200 km).

„Im März 2020 erklärte sich OneWeb zahlungsunfähig und stellte sich unter Gläubigerschutz in den USA (Chapter 11). Dabei blieb unklar, inwieweit die bisherigen Pläne noch verwirklicht werden können. Am 2. Oktober 2020 bestätigte das US-Insolvenzgericht den Reorganisationsplan von OneWeb und im Dezember 2020 startete das Nachfolgeunternehmen 36 weitere Satelliten.“ [27]

Die o.g. Satellitensysteme richten sich zwar auch an private Mobilfunkbenutzer in bereits gut erschlossenen Gebieten als Kunden, sollen aber vorzugsweise an Land der Versorgung von entlegenen, abgeschieden Regionen mit schlechter oder fehlender Mobilfunkversorgung dienen sowie der Funkversorgung von Schiffen und Flugzeugen. Als Zielgruppen werden auch insbesondere Firmen und Behörden genannt.

Die Satellitensysteme dienen häufig als „Backhaul“ oder „Backbone“, d.h. sie verbinden Teile von umfassenderen Netzen miteinander und kommunizieren dann nicht direkt mit den einzelnen Teilnehmern. Ein typisches Szenario ist in entlegenen Gebieten ohne Internetanschluss per Kupferleitung, Glasfaser oder terrestrische Funkstrecken die Anbindung von ansonsten isolierten Mobilfunk-Basisstationen an das übergeordnete Netz. Dies gilt auch für die Einbindung in zukünftige 5G-Systeme.

Die Ausführungen in den nachfolgenden Kapiteln sind angelehnt an den Beitrag „Mobilfunk per Satellit: Wunsch und Wirklichkeit“ von Dr. Marta Martínez-Vázquez im Tagungsband der 10. EMV-Tagung 2019 des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. [28]. Für eine vertiefende Betrachtung wird dieser Beitrag als Primärliteratur empfohlen.

5G NR: Das erste Mobilfunk-System mit integrierter Schnittstelle für Satellitenfunk

Wie oben ausgeführt, existiert schon seit Längerem eine ganze Fülle von satellitengestützten Mobilfunksystemen. Diese sind aber unabhängig von den terrestrischen Mobilfunksystemen 2G bis 4G.

5G NR ist nun das erste Mobilfunksystem, das die Nutzung von Kommunikationssatelliten als integralen Bestandteil vorsieht.

Für die Satellitenkommunikation von 5G NR werden die Hauptanwendungen gemäß Abb. 8 genannt.

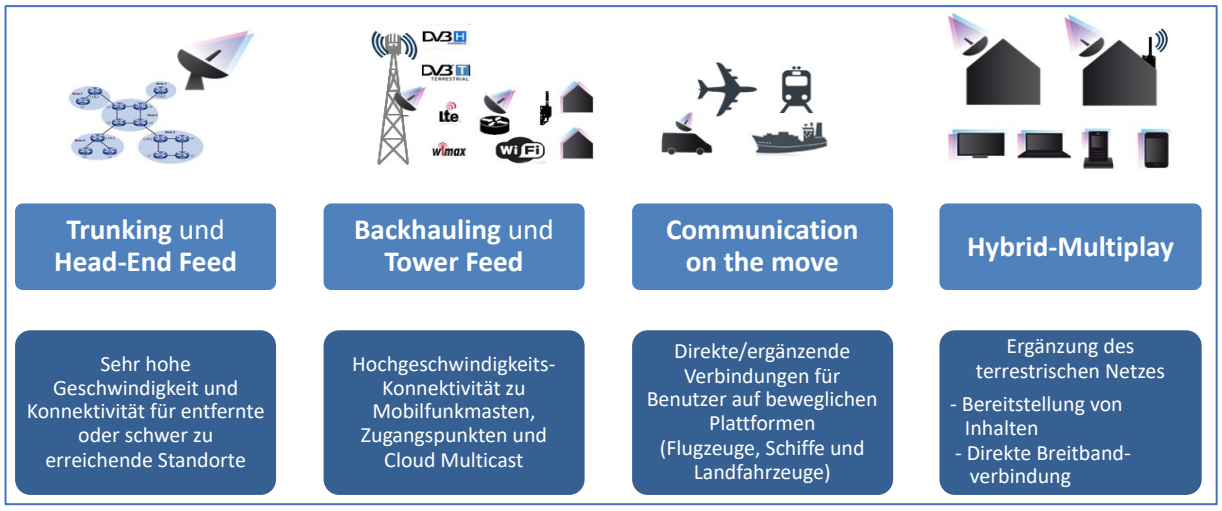

Abb. 8: Hauptanwendungen für 5G per Satellit [28] (Powerpoint-Präsentation)

Endgeräte für Satellitenkommunikation

Für die Nutzung von Satellitensystemen werden spezielle, für das jeweilige System entwickelte Telefone oder Terminals benötigt. Ursprünglich waren hierfür Endgeräte mit recht großen Antennen erforderlich. Viele Satelliten-Telefone sind aber mittlerweile kaum noch größer oder klobriger als die üblichen terres-

trischen Smartphones für 2G - 5G Mobilfunk, haben jedoch häufig etwas größere und auffälligere Antennen (vgl. Abb. 9 und 10). Für sie gelten die gleichen **S**pezifischen **A**bsorptions**R**aten (SAR), die es einzuhalten gilt, wie für die terrestrischen Mobilfunk-Smartphones. Aufgrund der großen Entfernung und der hohen atmosphärischen Streckendämpfung bei den verwendeten Frequenzen über 10 GHz ist die Empfangs-Feldstärke an der Erdoberfläche sehr niedrig, dementsprechend ist der Betrieb nur im Freien möglich und ohne Außenantenne nicht innerhalb von Gebäuden (ähnlich wie beim Empfang von Fernseh-Satelliten).

Abb. 9:

Satellitenkommunikationsgerät für Daten- und Sprachkommunikation mit größerer, abgesetzter Antenne, die auf den Satelliten ausgerichtet werden muss (Inmarsat). [29]

Abb. 10:

Satellitentelefone, v.l.n.r.:

- IsatPhone Pro/Inmarsat
  170 mm x 54 mm x 39 mm, 279 g,
  SAR-Wert: 1,6 W/kg am Kopf [28], [29];
- Iridium 9555 [29];
- Thuraya XT [29];
- Thuraya X-5 Touch Android
  145 mm x 78 mm x 24 mm, 262g,
  SAR-Wert: 1,865 W/kg am Kopf
  (Quelle: Thuraya, zitiert in [28])

Die drei Satelliten-Orbits: LEO, MEO, GEO/GSO

Satelliten befinden sich auf definierten Umlaufbahnen (Orbits) in bestimmten Höhenbereichen um die Erde (siehe Abb. 11 und Tab. 1).

Die wichtigsten Orbits für Satellitenanwendungen sind der Geosynchrone (GSO = **G**eo**s**ynchronous **O**rbit), seine Sonderform der geostationäre Orbit über dem Äquator (GEO = **G**eostationary **E**arth **O**rbit), der Mittlere (MEO = **M**edium **E**arth **O**rbit) und der niedrige Orbit (LEO = **L**ow **E**arth **O**rbit).

GEO-Satelliten in 39.500 km Höhe über dem Äquator bewegen sich exakt mit der Erdrotation und erscheinen somit als stationär in Bezug auf die Erdoberfläche; die Ausrichtung zwischen Bodenstation und Satellit ist daher fix und braucht nicht nachgeregelt zu werden. Ein einzelner GEO-Satellit erreicht eine Abdeckung von bis zu 34 % der Erdoberfläche, so dass bereits mit nur drei Satelliten eine nahezu globale Versorgung erzielt werden kann.

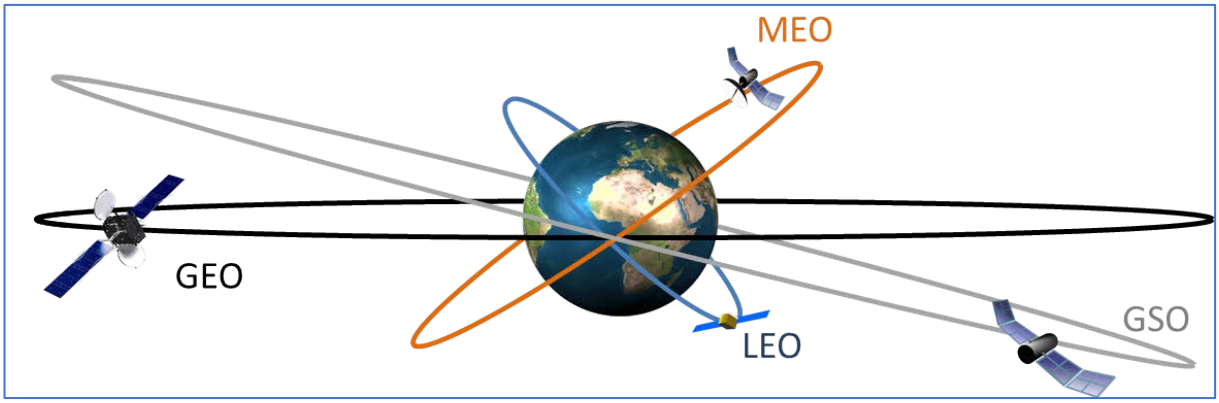

Abb. 11: Orbits LEO, MEO, GEO/GSO [28]

Höhen zwischen 1.200 km und 3.000 km werden aufgrund der dort hohen Strahlungsbelastung im inneren Van-Allen-Gürtel[1] nach Möglichkeit nicht genutzt, um das Risiko für Schäden an der Elektronik der Satelliten klein zu halten.

Typ	LEO	MEO	GEO/GSO
Höhe	500 - 1.600 km	5.000 - 15.000 km	36.000 km
Sichtbarkeit	ca. 10 - 40 Minuten	2 - 4 Stunden	24 Stunden
Lebensdauer	2 - 7 Jahre	10 - 15 Jahre	10 - 15 Jahre
Zeitverzögerung	Kurz	Mittel	Lang
Pfadverluste	Niedrig	Mittel	Hoch
Netzwerkkomplexität	Hoch	Mittel	Niedrig
Handover	Häufig	Seltener	Nie
Exemplarische Systeme	Iridium Next, Starlink, OneWeb, Telesat, LeoVantage	Viasat, SES (O3b)	Inmarsat GEO, Inmarsat Global-Xpress

Tab. 1: Vergleich wesentlicher Eigenschaften von GSO/GEO, MEO und LEO Satelliten [28]

[1] Der Van-Allen-Gürtel ist der Strahlungsgürtel der Erde. Er ist ein Ring energiereicher geladener Teilchen im Weltraum um die Erde, die durch das Erdmagnetfeld eingefangen werden. Der innere Van-Allen-Gürtel besteht hauptsächlich aus hochenergetischen Protonen. (Quelle: Wikipedia)

Frequenzbänder für die Satellitenkommunikation

Für die Satellitenkommunikation werden vorzugsweise die Frequenzbänder gemäß Tabelle 2 genutzt.

Band	Frequenzbereich	Eigenschaften
L	1 - 2 GHz	Mobile Anwendungen, Kommunikation für See- und Luftfahrt, verschiedene Bodengeräte
C	4 - 8 GHz	Geringere Übertragungsleistung, größere Bodengeräte
X / Ku	10 - 15 GHz	Höhere Übertragungsleistung, kleinere Bodengeräte
K / Ka	18 - 40 GHz	Hohe Übertragungsleistung, kleine Bodengeräte

Tab 2: Frequenzbänder für Satellitenkommunikation [28]

Der „Mobilfunk-Grill" von oben? – Immissionen an der Erdoberfläche

Wie steht es nun um die Berechtigung von Befürchtungen wie: „Wir werden durch die Satellitenstrahlung – vor allem durch Starlink von SpaceX mit seinen zehntausenden Satelliten – von oben gegrillt!"

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt als Beispiele Orientierungswerte für die Empfangsfeldstärken und Leistungsflussdichte*n* unterschiedlicher Satellitensysteme nur aufgrund der Entfernung, basierend auf den EIRP[2]-Richtwerten der ITU, (**I**nternational **T**elecommunication **U**nion, Internationale Fernmeldeunion) ohne Einbezug der zusätzlichen, nicht unerheblichen atmosphärischen Streckendämpfung.

Typ	Höhe	EIRP [dBW]	Leistungsflussdichte an der Erdoberfläche [µW/m²] *)	Elektrische Feldstärke an der Erdoberfläche [mV/m]
GEO/GSO	35.900 km	65	$0{,}2 \cdot 10^{-3}$	0,27
		55	$0{,}02 \cdot 10^{-3}$	0,09
MEO	8.000 km (O3b)	50	$0{,}12 \cdot 10^{-3}$	0,22
LEO	780 km (Iridium Next)	< 45	$< 4{,}2 \cdot 10^{-3}$	< 1,25

Tab. 3: Exemplarische Feldstärken und Leistungsflussdichten (Strahlungsdichten) aus verschiedenen Orbits an der Erdoberfläche [28]. *) 10^{-3} µW/m² = 0,001 µW/m² = 1 nW/m²

65 dBW EIRP entsprechen einer Äquivalenten isotropen Strahlungsleistung von $10^{6,5}$ W = 3.162 kW, 55 dBW entsprechen 316 kW, 50 dBW entsprechen 100 kW und 45 dBW entsprechen 31,6 kW.

Wie die obige Tabelle zeigt, liegen die von Kommunikationssatelliten verursachten Strahlungsdichten an der Erdoberfläche im Hauptstrahl bei weniger als 0,2 Tausendstel Mikrowatt pro Quadratmeter [µW/m²] (= 0,0002 µW/m²) im GEO/GSO- und MEO-Orbit sowie bei weniger als 5 Tausendstel µW/m² (= 0,005 µW/m²) im LEO-Orbit.

Diese Werte liegen weit unterhalb dessen, was von den üblichen terrestrischen Funkdiensten verursacht wird und sind selbst nach strengsten baubiologischen bzw. umweltmedizinischen Maßstäben als absolut unauffällig anzusehen.

[2] EIRP: **E**quivalent **I**sotropically **R**adiated **P**ower, Äquivalente isotrope Strahlungsleistung unter Berücksichtigung des Antennengewinns und somit des „Bündelungsfaktors" der Antenne.

5G in fünf Kapiteln

Der Autor hat das umfangreiche und vielseitige Thema „5G New Radio“ in insgesamt fünf Beiträgen behandelt, die gemeinsam unter dem übergeordneten Titel „5G in fünf Kapiteln“ im „baubiologie magazin“ des **I**nstituts für **B**aubiologie und **N**achhaltigkeit IBN (Rosenheim) erschienen sind [30]. Der hier vorliegende Beitrag befasst sich mit dem speziellen Thema der Satellitenkommunikation. Weitere vertiefende Themen sind:

- 5G Aus den Augen, aus dem Sinn – Stadtmöbel als Verstecke für Small Cells
- 5G Immissionsmessungen mit Breitbandmessgeräten der baubiologischen Messtechnik
- 5G NR Technische und messtechnische Aspekte (Entwurf der neuen VDB-Richtlinie „5G NR“)

Der Beitrag

- Volle Beschleunigung mit 5G – Einsatzgebiete, Ziele und Eigenschaften des Mobilfunksystems der 5. Generation

dient hingegen übergeordnet der orientierenden Einführung in die Thematik.

Literatur und Internetadressen

[1] https://www.youtube.com/watch?v=3479tkagiNo

[2] Parsonson, Andrew: SpaceX CEO Tweets Picture of Falcon 9 Fairing Packed with 60 Starlink Satellites; in: Rocket Rundown, May 13, 2019; https://rocketrundown.com/spacex-ceo-tweets-picture-of-falcon-9-fairing-packed-with-60-starlink-satellites/

[3] Holland, Martin: Satelliten: Bereits drastisch mehr „Beinahe-Kollisionen“ wegen Starlink; heise online → News → 08/2021, 21.08.2021; https://www.heise.de/news/Satelliten-Bereits-drastisch-mehr-Beinahe-Kollisionen-wegen-Starlink-6171314.html?utm_source=pocket-newtab-global-de-DE

[4] Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Starlink

[5] https://www.starlink.com/

[6] Using ground relays with Starlink; https://www.reddit.com/r/spacex/comments/edkmtw/using_ground_relays_with_starlink/

[7] Why SpaceX is Making Starlink; https://www.youtube.com/watch?v=giQ8xEWjnBs

[8] Starlink explained – why SpaceX needs 42,000 satellites; https://www.youtube.com/watch?v=tuFS0zOwyBg

[9] Holland, Martin: SpaceX widerspricht OneWeb: Keine Beinahe-Kollision von Satelliten; heise online → News → 04/2021, 21.04.2021; https://www.heise.de/news/SpaceX-widerspricht-OneWeb-Keine-Beinahe-Kollision-von-Satelliten-6022806.html

[10] Datawrapper: https://www.datawrapper.de/_/ng3he/

[11] Rienow, Jürgen: Starlink-Satelliten: Lichterketten am Nachthimmel; Youtube-Video der Stiftung Planetarium Berlin; https://www.youtube.com/watch?v=RKrrHbFHtCw

[12] Banner, Tanja: “Starlink”-Satelliten von SpaceX: Das steckt hinter dem Projekt von Elon Musk; https://www.fr.de/wissen/starlink-satelliten-spacex-elon-musk-projekt-internet-weltall-falcon-9-13699873.html

[13] Görmann, Marcel: Starlink-Projekt: Tesla-Chef Musk verändert den Nachthimmel - Astronomen sind alarmiert; https://www.merkur.de/welt/weltall-lichterkette-tesla-universum-elon-musk-spacex-nacht-himmel-astronomen-starlink-phaenomen-show-zr-13445770.html

[14] Evannex: SpaceX Innovates Starlink Project With 'Darksat' To Save The Night Sky; https://insideevs.com/news/423861/spaces-starlink-project-darksat/

[15] Holland, Martin: Starlink & Co.: Auch Radioastronomen schlagen nun Alarm; heise online → News → 10/2020, 12.10.2020 https://www.heise.de/news/Starlink-Co-Auch-Radioastronomen-schlagen-nun-Alarm-4926355.html?utm_source=pocket-newtab-global-de-

[16] Holland, Martin: Experten: Folgen von Starlink & Co. für Astronomie „unerheblich“ bis „extrem“; heise online → News → 08/2020, 26.08.2020; https://www.heise.de/news/Experten-Folgen-von-Starlink-Co-fuer-Astronomie-unerheblich-bis-extrem-4879555.html

[17] Leidinger, Saskia: Wie Elon Musk den Weltraum vermüllt; https://www.t-online.de/digital/id_87356328/experte-zu-starlink-fuer-uns-ist-das-zukuenftiger-weltraumschrott-.html

[18] Holland, Martin: Sieg für SpaceX: FCC erlaubt niedrigeren Orbit für Starlink-Satelliten; heise online → News → 04/2021, 28.04.2021 https://www.heise.de/news/Sieg-fuer-SpaceX-FCC-erlaubt-niedrigeren-Orbit-fuer-Starlink-Satelliten-6030182.html

[19] Paleja, Ameya: SpaceX’s Satellites Cause 1,600 Near-Collisions Each Week – And things are only going to get worse; in: Interesting Engineering → Science, 20.08.2020; https://interestingengineering.com/spacexs-satellites-cause-nearly-1600-near-collisions-each-week?_source=newsletter&_campaign=YqX4R9DJgzvkA&_uid=lNbWnYqXay&_h=3b67e7458b125af9b8b9b0afb723d4afc90bf2db&utm_source=newsletter&utm_medium=mailing&utm_campaign=Newsletter-23-08-2021

[20] https://de.wikipedia.org/wiki/Internetzugang_über_Satellit

[21] https://www.inmarsat.com/

[22] https://de.wikipedia.org/wiki/Iridium_(Kommunikationssystem)

[23] https://de.wikipedia.org/wiki/Thuraya

[24] skyDSL: Highspeed Internet über All; https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden/Satelliten-Internet/info/howitworks/spotbeam

[25] STARDSL: Internet via Satellit; https://www.stardsl.net/

[26] SOSAT Internet via Satellit; http://www.sosat.com/

[27] https://de.wikipedia.org/wiki/OneWeb

[28] Martínez-Vázquez, Marta (IMST): Mobilfunk per Satellit: Wunsch und Wirklichkeit; in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 51-68; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8; https://baubiologie.net/publikationen/emv/

[29] https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitentelefon

[30] Virnich, Martin: 5G in fünf Kapiteln; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juni 2021; https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln

1. Update, August 2021

© Dr.-Ing. Martin H. Virnich
ibu – Ingenieurbüro für Baubiologie und Umweltmesstechnik
Mönchengladbach, August 2021