



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“?

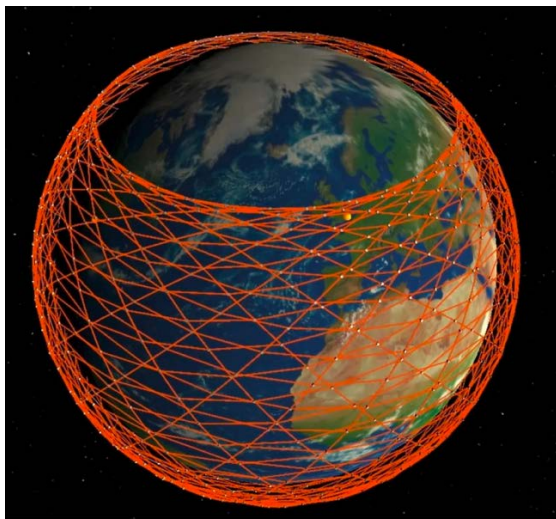


Abb. 1: Computeranimation des Starlink-Netzwerks, [1]



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 (Low Earth Orbit) 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: Die beiden Stapel mit Starlink-Satelliten, bereit zum Aussetzen im Orbit [3]



Abb. 4: Starlink-Satelliten auf ihrer Erdumlaufbahn [4]. 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 [5], [6] und [7].

Obwohl sie relativ klein sind, können die Starlink-Satelliten häufig von der Erdoberfläche aus mit bloßem Auge beobachtet werden [3]. Es gibt Befürchtungen, dass bei der geplanten enorm großen Zahl von LEO-Satelliten der Sternenhimmel überstrahlt werden könnte ([8], [9]). Als Reaktion hierauf sollen die künftigen Starlink-Satelliten mit einer dunklen Oberfläche versehen werden („Darksat“, [10]).

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 [11]. 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.

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 [12]). Etablierte Systeme sind beispielsweise

- Inmarsat: 2 GEO-Satelliten, seit 1983 [13],
- 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 [14],
- 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.”* [15]
- skyDSL seit 1999 [16],
- STARDSL [17].

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 [18].

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

- O3b Networks (SES): Soll 3 Milliarden Menschen in strukturschwachen Gebieten der Erde in Äquatornähe Internetzugang und Telekommunikationsdienste bieten. Es handelt sich um MEO-Satelliten (**M**edium **E**arth **O**rbital) 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.
- LeoVantage (Telesat LEO): 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.
- V-Band Konstellation (Boeing): 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 Höhe).

„Ende März 2020 meldete das Unternehmen jedoch Insolvenz an, weil es ihm während der Covid-19-Pandemie nicht gelungen war, das nötige Kapital für die Fertigstellung der Konstellation einzuwerben und ein Überbrückungskredit durch den ebenfalls angeschlagenen Investor Softbank nicht zustande kam. Das Unternehmen stellte sich unter Gläubigerschutz nach Chapter 11 des US-Insolvenzrechts und gab an, bis zu einem möglichen Verkauf das operative Geschäft weitgehend fortführen zu können.“ [19]

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, abgechieden 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. [20]. 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 im Rahmen von 5G NR werden die Hauptanwendungen gemäß Abb. 5 genannt.

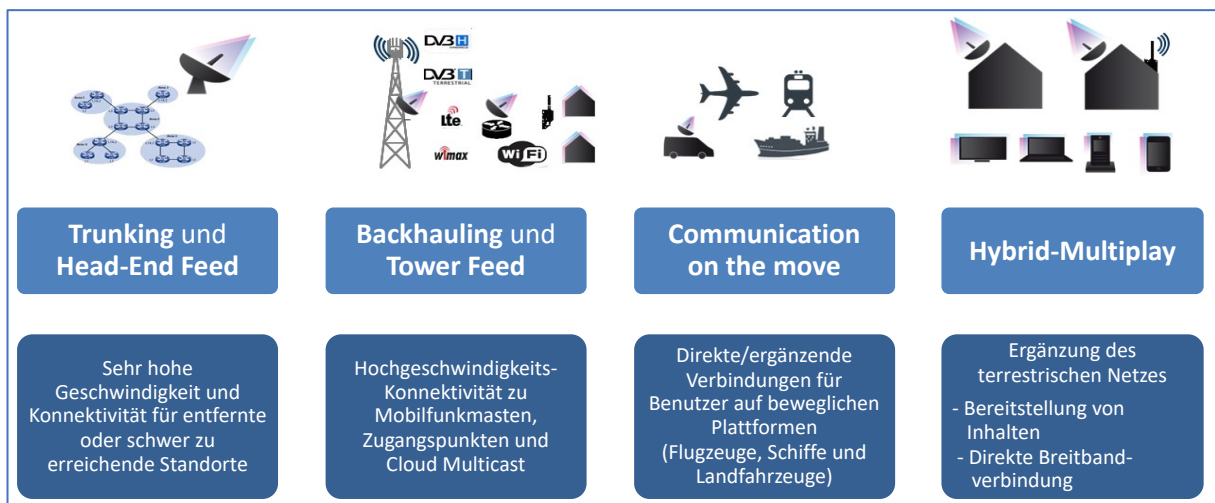


Abb. 5: Hauptanwendungen für 5G per Satellit [20] (Powerpoint-Präsentation)

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 terrestrischen Smartphones für 2G - 5G Mobilfunk, haben jedoch häufig etwas größere und auffälligere Antennen (vgl. Abb. 6 und 7). Für sie gelten die gleichen Spezifischen AbsorptionsRaten (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. 6:

Satellitenkommunikationsgerät für Daten- und Sprachkommunikation mit größerer, abgesetzter Antenne, die auf den Satelliten ausgerichtet werden muss (Inmarsat). [21]



Abb. 7:

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 [20], [21];
- Iridium 9555 [21];
- Thuraya XT [21];
- 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 [20])

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

Satelliten befinden sich auf definierten Umlaufbahnen (Orbits) in bestimmten Höhenbereichen um die Erde (siehe Abb. 8 und Tab. 1).

Die wichtigsten Orbits für Satellitenanwendungen sind der Geosynchrone (GSO = **G**eosynchronous **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.

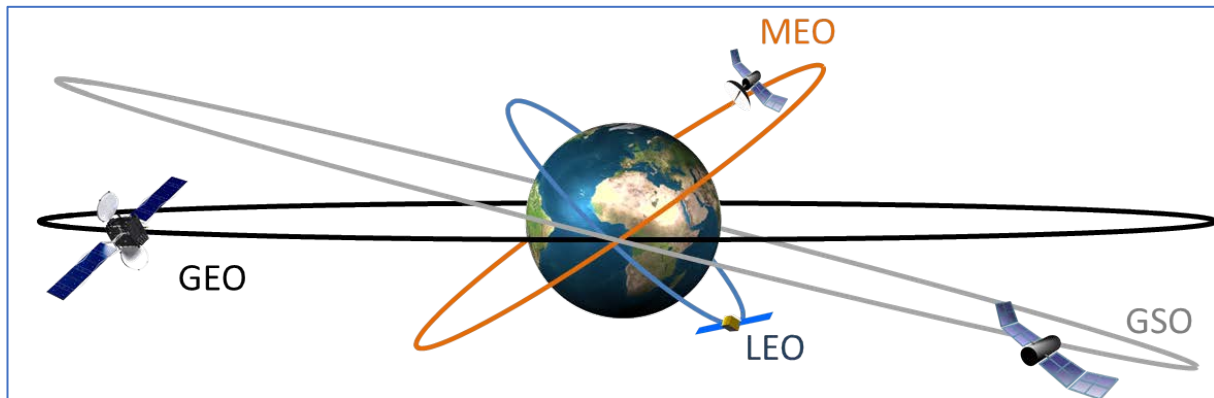


Abb. 8: Orbits LEO, MEO, GEO/GSO [20]

Höhen zwischen 1.200 km und 3.000 km werden aufgrund der dort hohen Strahlungsbelastung im inneren Van-Allen-Gürtel¹ 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 [20]

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 [20]

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)

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 Leistungsflussdichten unterschiedlicher Satellitensysteme nur aufgrund der Entfernung, basierend auf den EIRP²-Richtwerten der ITU, (International Telecommunication Union, Internationale Fernmeldeunion) ohne Einbezug der zusätzlichen, nicht unerheblichen atmosphärischen Streckendämpfung.

Typ	Höhe	EIRP [dBW]	Leistungsflussdichte an der Erdoberfläche [$\mu\text{W}/\text{m}^2$ *)	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 [20]. *) $10^{-3} \mu\text{W}/\text{m}^2 = 0,001 \mu\text{W}/\text{m}^2 = 1 \text{ nW}/\text{m}^2$

65 dBW EIRP entsprechen einer Äquivalenten isotropen Strahlungsleistung von $10^{6,5} \text{ W} = 3.162 \text{ kW}$, 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 [$\mu\text{W}/\text{m}^2$] (= $0,0002 \mu\text{W}/\text{m}^2$) im GEO/GSO- und MEO-Orbit sowie bei weniger als 5 Tausendstel $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (= $0,005 \mu\text{W}/\text{m}^2$) 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.

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 Instituts für Baubiologie und Nachhaltigkeit IBN (Rosenheim) erschienen sind [22]. 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.

² EIRP: Equivalent Isotropically Radiated Power, Äquivalente isotrope Strahlungsleistung unter Berücksichtigung des Antennengewinns und somit des „Bündelungsfaktors“ der Antenne.

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] Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Starlink>
- [4] <https://www.starlink.com/>
- [5] Using ground relays with Starlink;
https://www.reddit.com/r/spacex/comments/edkmtw/using_ground_relays_with_starlink/
- [6] Why SpaceX is Making Starlink; <https://www.youtube.com/watch?v=giQ8xEWjnBs>
- [7] Starlink explained – why SpaceX needs 42,000 satellites;
<https://www.youtube.com/watch?v=tuFS0zOwyBg>
- [8] 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>
- [9] 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-nachthimmel-astronomen-starlink-phaenomen-show-zr-13445770.html>
- [10] Evannex: SpaceX Innovates Starlink Project With 'Darksat' To Save The Night Sky;
<https://insideevs.com/news/423861/spaces-starlink-project-darksat/>
- [11] 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
- [12] https://de.wikipedia.org/wiki/Internetzugang_über_Satellit
- [13] <https://www.inmarsat.com/>
- [14] [https://de.wikipedia.org/wiki/Iridium_\(Kommunikationssystem\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Iridium_(Kommunikationssystem))
- [15] <https://de.wikipedia.org/wiki/Thuraya>
- [16] skyDSL: Highspeed Internet über All;
<https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden/Satelliten-Internet/info/howitworks/spotbeam>
- [17] STARDSL: Internet via Satellit;
<https://www.stardsl.net/>
- [18] SOSAT Internet via Satellit;
<http://www.sosat.com/>
- [19] <https://de.wikipedia.org/wiki/OneWeb>
- [20] 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/>
- [21] <https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitentelefon>
- [22] Virnich, Martin: 5G in fünf Kapiteln; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juli 2020;
<https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln>