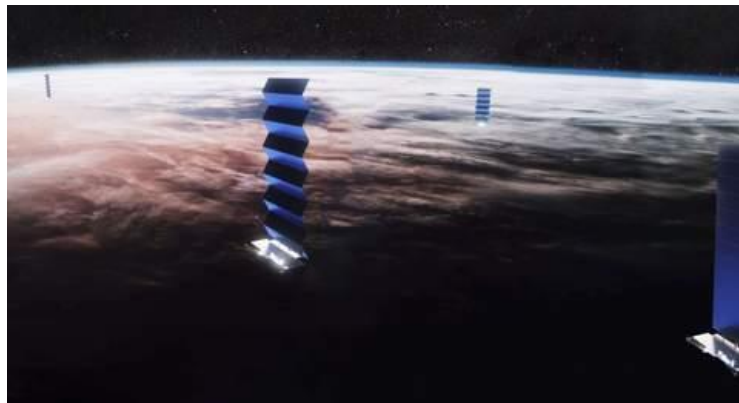


Leistungsfähigkeit von Satelliteninternet gemäß dem Starlink-Konzept



Quelle: SpaceX

**STUDIE DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE MITTELHESSEN IM AUFTRAG DES
BUNDESVERBANDES BREITBANDKOMMUNIKATION E.V. (BREKO)**

13. Juli 2021

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Kristof Obermann

Leistungsfähigkeit von Satelliteninternet gemäß dem Starlink-Konzept

Inhalt

EXECUTIVE SUMMARY	2
EINLEITUNG UND PROJEKTZIEL	2
IST-STAND: BREITBANDVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND	3
ÜBERSICHT: TECHNOLOGIEN FÜR BREITBAND-INTERNETZUGÄNGE VIA SATELLIT UND HOCHFLIEGENDE UNBEMANNTE PLATTFORMEN (HAP)	4
BREITBAND-INTERNETZUGÄNGE MIT GEO-SATELLITEN	5
BREITBAND-INTERNETZUGÄNGE MIT LEO-SATELLITEN GEMÄß DEM STARLINK-KONZEPT	8
STARLINK-NETZWERK	9
SATELLITEN	10
USER TERMINALS	14
GATEWAYS	14
KAPAZITÄT EINES SATELLITEN	15
KAPAZITÄT EINES GATEWAYS	17
KAPAZITÄT DES STARLINK SATELLITEN-NETZES	18
LATENZ	20
VERFÜGBARKEIT	22
MOBILE NUTZUNG	24
SICHERHEIT	24
VERGLEICH STARLINK-SATELLITEN-NETZ MIT FTTH-GLASFASERANSCHLÜSSEN	25
FAZIT	26
REFERENZEN	29
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	33

Haftungsausschluss

Die in dieser Publikation veröffentlichten Informationen spiegeln die Meinung des Autors wider und stimmen nicht notwendigerweise mit den Ansichten des BREKO überein. Es wird keine Gewähr für die Richtigkeit der in diesem Bericht enthaltenen Daten gegeben und keine Verantwortung für ihre etwaige Verwendung übernommen. Die Wiedergabe der hier zur Verfügung gestellten Texte ist zulässig, sofern ein Hinweis auf die Quelle sowie die Unverbindlichkeit erfolgt.

Executive Summary

Über das vom US-Raumfahrtunternehmen SpaceX betriebene Satellitennetzwerk Starlink, das mittlerweile auch in Deutschland Internetanschlüsse anbietet, lässt sich keine flächendeckende Versorgung der deutschen Haushalte mit Bitraten von mindestens 100 Mbit/s im Download erreichen.¹

Selbst mit sehr optimistischen Annahmen lassen sich über das Starlink-Netz maximal 1,3 Mio. 100 Mbit/s-Anschlüsse oder 130.000 1 Gbit/s-Anschlüsse in Deutschland realisieren. Die Upstream-Bitraten entsprechen dabei maximal 30 bis 40 % der Downstream-Bitraten.

Satelliteninternet ist damit keine Alternative für Glasfaseranschlüsse bis in die Gebäude und Wohnungen. Mit Glasfaseranschlüssen können Bitraten von 1 Gbit/s, 10 Gbit/s und künftig sogar noch höhere Bitraten (100 Gbit/s, 400 Gbit/s) sowohl im Up- als auch im Downstream realisiert werden.

Trotz der Nachteile gegenüber Glasfasernetzen handelt es sich beim Starlink-Netz um ein technologisch sehr interessantes Netz, das u.a. für die folgenden Anwendungsszenarien sehr gut geeignet erscheint:

Weltweite und flächendeckende Versorgung von Gegenden mit geringer Bevölkerungsdichte (z.B. ländliche Gebiete, Weltmeere, Arktis, Antarktis, Wüsten, Steppen, Weideflächen, Gebirge, falls eine Sichtverbindung möglich ist auch Wälder). Daher kann das Starlink-Netz auch in Deutschland als Ergänzung zu bestehenden Breitbandtechnologien gesehen werden, mit der Haushalte eine Grundversorgung und digitale Teilhabe erhalten, die ansonsten auch in den nächsten Jahren nicht sinnvoll eigenwirtschaftlich oder auch mittels Förderung erschlossen werden können.

Die Stärke des Starlink-Netzes liegt weniger in der bereitgestellten Kapazität als vielmehr in der globalen Vernetzung sehr vieler Endgeräte mit moderaten Bitraten aber geringen Latenzen bei hinreichend großen Entfernungen. Die wirtschaftliche, politische und auch militärische Bedeutung des Satelliteninternets sollte daher nicht unterschätzt werden.

Bei den Ergebnissen ist auch zu berücksichtigen, dass derzeit noch nicht absehbar ist, ob und wann Starlink sein Endausbauziel von insgesamt knapp 42.000 Satelliten im Weltall erreichen wird. Dies wird u.a. von der Verfügbarkeit bzw. Genehmigung der entsprechenden Umlaufbahnen und Frequenzen für die Daten- und Telemetrieverbindungen abhängen.

Einleitung und Projektziel

Mit Satelliteninternet wollen Unternehmen wie das vom US-Raumfahrtunternehmen SpaceX betriebene Satellitennetzwerk Starlink zukünftig weltweit Breitband-Internetzugänge zur Verfügung stellen. Was vor wenigen Jahren noch schwer vorstellbar war, ist mittlerweile auch in Deutschland Realität geworden. Seit März 2021 laufen Beta-Tests in ausgewählten Regionen in Deutschland [1]. Derzeit nutzen nach Angaben von Starlink 69.000 Beta-Tester das Angebot. Bis Mitte 2022 sollen 500.000 zahlende Kunden das Angebot nutzen [2].

Auch in der politischen Diskussion rückt Satelliteninternet zunehmend ins Blickfeld. So hat das für den Ausbau der digitalen Infrastruktur zuständige Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Anfang

¹ In der Öffentlichkeit wird anstelle der Bitrate oft auch der Begriff Bandbreite synonym verwendet. Die technisch korrekte Bezeichnung ist Bitrate mit der Einheit bit/s, da sie die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der Daten übertragen werden können. Die Bandbreite hingegen hat die Einheit Hz und bezeichnet den Frequenzbereich, den ein Signal belegt. Die Bandbreite und die Bitrate sind über die so genannte spektrale Effizienz miteinander verknüpft. Beispielsweise ergibt eine spektrale Effizienz von 2 bit/s/Hz und eine Bitrate von 20 MHz eine Bitrate von 40 Mbit/s.

Juni 2021 einen sogenannten „Digitalisierungszuschuss“ in Form einer Förderung von Internetanschlüssen in Einzel- und Randlagen über eine nicht-leitungsgebundene Internetanbindung (z.B. über Satellit) angekündigt [3].

Es stellt sich die Frage, welche Leistungsfähigkeit Internetzugänge über Satellit haben und inwieweit Satelliteninternet eine Alternative für Glasfasernetze bis in die Gebäude (FTTB) und Wohnungen (FTTH) in Deutschland sein kann.

In der vorliegenden Grundlagenstudie soll die Leistungsfähigkeit von Satelliten gestützten Breitbandnetzen technisch untersucht und mit der Leistungsfähigkeit von Glasfaseranschlüssen verglichen werden. Insbesondere folgende Punkte sollen dabei näher betrachtet werden:

- Maximale, typische und minimale Bitraten im Up- und Downstream pro Teilnehmer
- Gesamtkapazität des Netzes
- Mögliche Anzahl paralleler Anschlussleitungen pro Satellit bzw. Fläche
- mobile Nutzung
- Sicherheit von Satelliteninternet
- Verfügbarkeit bzw. Ausfallzeiten
- Latenz
- Wetterabhängigkeit
- Endgeräte (CPE) und ggf. erforderliche Installationen bei den Teilnehmern
- Verfügbarkeit von entsprechendem Frequenzspektrum
- Verfügbarkeit von Umlaufbahnen für Satelliten

Die Bearbeitung der genannten Punkte erfolgt vorbehaltlich der Verfügbarkeit von entsprechenden Informationen. Die Studie orientiert sich an den Parametern des Starlink-Konzeptes des Unternehmens SpaceX. Kostenbetrachtungen sind nicht Gegenstand der Studie.

Ist-Stand: Breitbandversorgung in Deutschland

2020 ergab sich in Bezug auf die Breitbandverfügbarkeit in Festnetzen in Deutschland folgendes Bild:

- Ende 2020 hatten [4]:
 - 94,5 % aller Haushalte Zugang zu Breitbandanschlüssen mit mindestens 50 Mbit/s.
 - 88,5 % aller Haushalte Zugang zu Breitbandanschlüssen mit mindestens 100 Mbit/s.
 - 59,6 % aller Haushalte Zugang zu Breitbandanschlüssen mit mindestens 1000 Mbit/s.
- 70 % (25,4 Mio.) der insgesamt 36,1 Mio. aktiven Breitbandanschlüsse basierten Ende 2020 auf unterschiedlichen DSL-Technologien [5].
- 24 % (8,7 Mio.) Anschlüsse basieren auf HFC-Netzen [5].
- Auf Glasfaserleitungen, die bis in die Wohnung oder ins Haus der Kunden reichen (FTTB/FTTH), beruhten Ende 2020 rund 1,9 Mio. Anschlüsse. Verfügbar („homes passed“) sind ca. 6,6 Mio Anschlüsse [5].
- „Rund 23.000 Kunden nutzten zum Jahresende 2020 einen nahezu ortsunabhängigen Zugang zum Internet über Satellit. Die Nachfrage verharrt weiterhin auf niedrigem Niveau, da bei entsprechender Verfügbarkeit alternative Zugangsmöglichkeiten preisgünstiger angeboten werden und zudem oftmals eine höhere maximal mögliche Bandbreite aufweisen. In Regionen, die nicht oder unzureichend durch andere Technologien erschlossen sind, kann Satelliteninternet aber einen Beitrag zu einer vollständigen

Breitbandversorgung leisten.“ [5]. Die Nutzerzahlen für satellitenbasierte Internetzugänge sind seit 2005 rückläufig, so dass von einer Nischentechnologie gesprochen werden kann [6].

Übersicht: Technologien für Breitband-Internetzugänge via Satellit und hochfliegende unbemannte Plattformen (HAP)

Ende 2020 befanden sich etwa 3.400 Satelliten im Orbit [7]. Bei Satelliten unterscheidet man grundsätzlich zwischen:

- GEO-Satelliten: Satelliten, die sich auf einer Kreisbahn 35.786 km über der Erdoberfläche über dem Äquator befinden. Sie folgen der Erdrotation und befinden sich daher im Idealfall immer über demselben Punkt der Erdoberfläche bzw. dem Äquator.
- MEO-Satelliten: Satelliten, die sich in einer Höhe zwischen 2000 und 35.786 km über der Erdoberfläche befinden. Sie werden für Kommunikationssatellitensysteme (z.B. Globalstar, O3b mPower) sowie Navigationssatelliten (z.B. GPS, Galileo, GLONASS) verwendet.
- LEO-Satelliten: Satelliten, die sich in einer Höhe zwischen 200 und 2.000 km über der Erdoberfläche befinden. LEO-Satelliten sind kleiner, leichter und günstiger als GEO-Satelliten [8]. Abbildung 1 gibt eine Übersicht über derzeit geplante oder sich bereits in Umsetzung befindlicher Systeme:
 - Starlink mit bis zu 42.000 Satelliten im Endausbau (davon Ende Mai 2021 1663 bereits realisiert [9]).
 - GW (China) mit 12.992 Satelliten im Endausbau.
 - OneWeb mit etwa 6.372 geplanten Satelliten u.a. mit Beteiligung von Airbus. In der ersten Phase will OneWeb 650 Satelliten ins All schießen. Bisher hat OneWeb 74 Satelliten stationiert.
 - Amazon (Kuiper). Derzeit plant Project Kuiper, eine Konstellation aus ca. 3.236 LEO-Satelliten aufzubauen. Project Kuiper hat erst im Juli 2020 die Autorisierung für den Betrieb einer Satellitenkonstellation über dem Gebiet der USA erhalten. In diesem Zusammenhang kündigte Amazon an, mindestens 10 Milliarden US-Dollar in das Projekt investieren zu wollen.
 - Telesat. Ziel von TeleSat LEO ist es, mit einer vergleichsweise überschaubaren Zahl von Satelliten eine weltweite Abdeckung zu erlangen. Alternativ bewirbt das kanadische Unternehmen sein System auch als Angebot für Betreiber von Mobilfunknetzen: Diese sollen ihre lokalen Netze über die TeleSat-Konstellation an das globale Internet anschließen können. TeleSat gibt an, schon 2022 in den flächendeckenden Betrieb einsteigen zu können [10].
 - China Aerospace Science and Industry Corporation (CASIC, Hongyun). Das staatliche Unternehmen China Aerospace Science and Industry Corporation (CASIC) verfolgt mit dem Hongyun-Projekt das Ziel, ein weltweites Netz aus 156 LEO-Satelliten zu bilden. Ein erster Satellit wurde im Dezember 2018 von China aus ins Weltall geschickt [10].
 - Galaxy Space. Galaxy Space hat im Januar 2020 einen ersten Satelliten stationiert. Über die nächsten Jahre sollen daraus 144 Satelliten werden, die Internetzugang per 5G ermöglichen. Ob die Satellitenkonstellation eine direkte Verbindung von 5G-Endgeräten erlauben oder aber zur Anbindung von 5G-Bodenstationen dienen soll, ist den öffentlich zugänglichen Informationen nicht zu entnehmen [10].
 - China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC, Hongyun)
 - Kleo Connect
 - AST & Science
 - Boeing
 - Kepler Communications

- Lynk
- Pacific Dataport
- Viasat



ABBILDUNG 1: ÜBERSICHT ÜBER GEPLANTE LEO-SATELLITEN-INTERNET SYSTEME. QUELLE: [10]

Darüber hinaus gibt es so genannte High-altitude platform station (Abkürzung HAP oder HAPS). Hierbei handelt es sich um unbemannte Flugobjekte in einer Höhe von 20 bis 50 km an einem festgelegten Fixpunkt relativ zur Erde [11], die u.a. auch für die Realisierung von Telekommunikationsdiensten verwendet werden können [11,12,13]. Einige derartiger Projekte wie etwa das von Google namens Loon [12] oder Facebook [13] wurde aber bereits wieder eingestellt.

Non Terrestrial Networks wie Satellitennetze oder HAPs sind auch Bestandteil von 5G (3GPP ab Rel. 17) [15] und werden derzeit in Forschungsprojekten (z.B. SATis5) adressiert [16].

Breitband-Internetzugänge mit GEO-Satelliten

Zurzeit gibt es etwa 300 geostationären Satelliten [17]. Die Lebensdauer eines GEO-Satelliten beträgt mehr als 15 Jahre [18]. Abbildung 2 zeigt die Anordnung bestehend aus GEO-Satellit, End User Terminal und Gateway inkl. Internetanbindung.

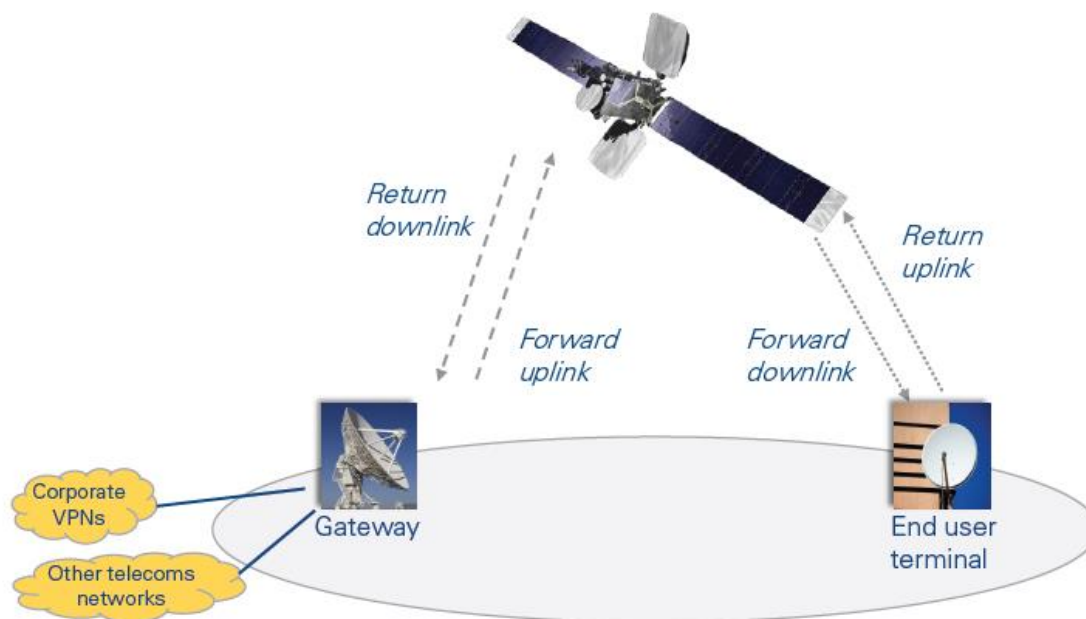


ABBILDUNG 2: SATELLITEN-INTERNET BESTEHEND AUS GEO-SATELLIT, END USER TERMINAL UND GATEWAY MIT INTERNET-ANBINDUNG. QUELLE: [18]

Die Übertragungsrichtung vom Satelliten zur Erde wird als Downlink und die umgekehrte Richtung als Uplink bezeichnet. Der Datenfluss vom Netz Richtung Teilnehmer (Downstream) wird als forward und der Datenfluss vom Teilnehmer in Richtung Netz (Upstream) als return bezeichnet.

„Um einen Internetzugang über Satellit zu nutzen, ist die Installation einer Satellitenschüssel außen am Gebäude des Endkunden erforderlich. Mit Hilfe dieser Schüssel empfängt der Nutzer das Signal des Satelliten und sendet diese auch an ihn. Der Unterschied zu einer TV-Schüssel besteht darin, dass die Satellitenschüssel eine Empfangseinheit, genannt LNB (englisch für „Low Noise Block“) besitzt, die Signale empfangen, aber auch versenden kann. Zusätzlich zur Satellitenantenne sowie der Sende- und Empfangseinheit wird ein Modem benötigt, das als Anschluss der Anlage an das Hausnetz dient. Die Installation der Endkundengeräte (Modem und Schüssel) kann entweder selbst oder auf Wunsch durch Fachleute vorgenommen werden. Da die richtige Installation für die Performance bei GEO-Satelliten entscheidend ist und einige Zeit in Anspruch nimmt, wird sie von den Anbietern durch Fachleute empfohlen.“ [6]

Die genaue Position eines GEO-Satelliten wird als Abweichung vom 0. Längengrad, dem Null- oder Greenwich Meridian, beschrieben und ist wichtig für die Ausrichtung der Endkundenantenne. Am nullten Längengrad wird die Erde gedanklich in Ost und West separiert. Der GEO-Satellit von Astra befindet sich z.B. auf der Position 19,2° Ost [6].

Problematisch ist insbesondere die hohe Latenz für die Strecke Gateway – Satellit – End User, die je nach Standort des Gateways bzw. End Users im Bereich von 240 bis 250 ms liegen kann. Bei einer bidirektionalen Verbindung wird der Weg (sog. Anfrage-Antwort-Handshake) zweimal zurückgelegt. Damit beträgt die Latenz – ohne Berücksichtigung weiterer möglicher Verzögerungsfaktoren – mindestens 480 bis 500 ms [8]. Aus diesem Grund ist die Nutzung von Echtzeitanwendungen wie beispielsweise Onlinespielen, 4G (50 ms) oder 5G (1 ms) eingeschränkt [6,8]. Sprach- und auch Videotelefoniedienste hingegen funktionieren problemlos [8]. Eutelsat rät selbst davon ab, GEO-Satelliten-Internet für Dienste zu nutzen, die - wie etwa viele Online-Games - eine sehr geringe Latenz erfordern, und weist darauf hin, dass stark gesicherte Seiten und auch VPN-Verbindungen möglicherweise nur schwer zugänglich sind [19].



a) 23,5° Ost/Astra2Connect

b) 31,5° Ost/Avanti HYLAS 2B

ABBILDUNG 3: AUSLEUCHTZONEN VERSCHIEDENER GEO-SATELLITEN. QUELLE: [8]

Deutliche Leistungsverbesserungen der Satellitentechnologie kann in jüngerer Vergangenheit durch den vermehrten Einsatz von High Throughput Satellites (HTS), anstatt der zuvor primär genutzten Fixed Satellite Services (FSS) beobachtet werden. HTS stellen durch die Verwendung des Ku- und Ka-Bandes, mehrere Ausleuchtzonen pro Satellit (Spotbeam-Technologie) sowie einer Frequenzmehrfachnutzung deutlich höhere Kapazitäten als FSS Satelliten bereit. Die Kapazitäten (Summenbitrate Up- und Downstream) lagen 2018 bei 300 Gbit/s bzw. ab 2020 bei 1.000 Gbit/s² [6]. Die bereitgestellte Kapazität müssen sich jedoch alle Teilnehmer einer Ausleuchtzone teilen. Sind die Kapazitätsgrenzen erreicht, so führt dies zu reduzierten Teilnehmer-Datenraten und/oder -Verfügbarkeiten [6]. Beispiel: Bei einer Gesamtdatenrate des Satelliten von 1.000 Gbit/s im Downstream ergibt sich bei einer Million aktiven Teilnehmern eine Datenrate von 1 Mbit/s pro Teilnehmer.

„Größere Marktaktivitäten lassen sich in Deutschland seit Jahren nur von den Satellitenbetreibern SES S.A. sowie Eutelsat erkennen. Avanti Communications vermarktet über einen Reseller Produkte für Geschäftskunden. Am deutschen Markt waren 2018 acht Servicebetreiber aktiv, die entweder auf die Satelliten von SES S.A. oder Eutelsat zurückgriffen. Ein einzelner Serviceanbieter griff auf die Dienste aller drei Satellitenbetreiber zurück (vgl. Abbildung 4).“ [6]. Darüber hinaus gibt es noch die Anbieter Signalhorn und EuroSkyPark.

² Der Eutelsat GEO Satellit Konnect zieht seit Ende 2020 auf 7 Grad Ost seine Bahn. Er verfügt über eine Gesamtkapazität von 75 GBit/s. Mit 65 Spot-Beams leuchtet Konnect Europa aus, fünf davon sind für Deutschland vorgesehen. 2022 will Eutelsat einen VHTS (Very High Throughput Satellite) ins All befördern, der eine Gesamtkapazität von 500 GBit/s bereitstellen wird [20].

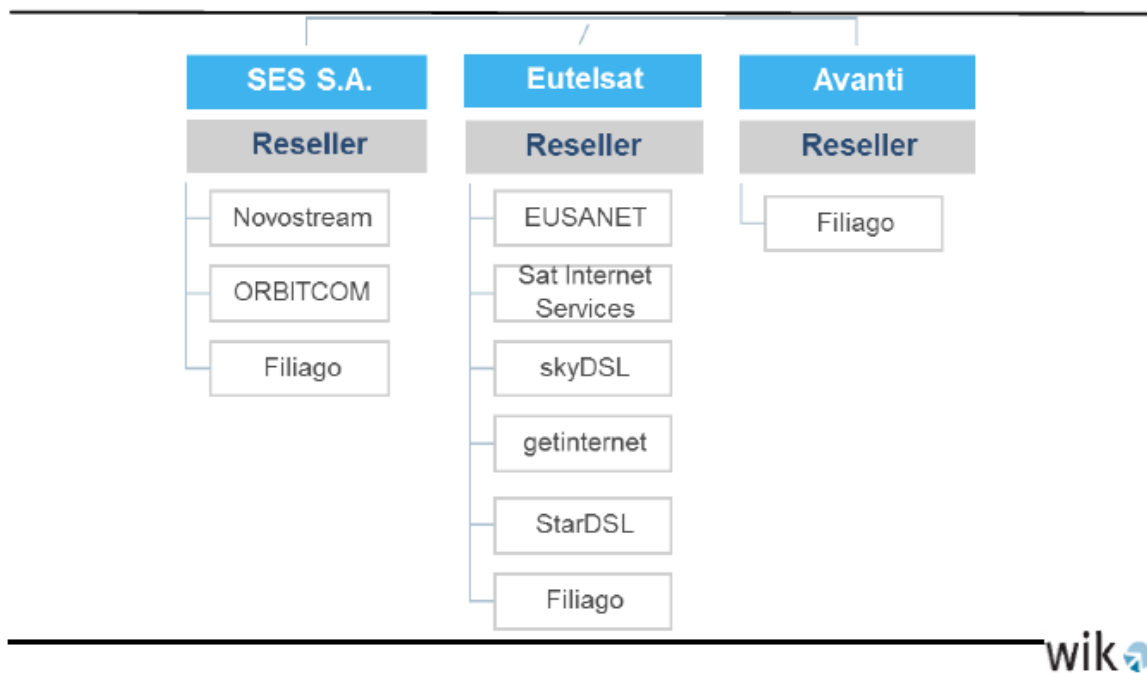


ABBILDUNG 4: ANBIETER FÜR GEO-SATELLITEN-INTERNET IN DEUTSCHLAND. QUELLE: [6]

Gemäß [6] betragen die monatlichen Kosten für einen Satelliten-Internetanschluss mit 50/6 Mbit/s (Downstream/Upstream) zwischen 59,80 € und 64,80 €. Zum Vergleich: Für einen VDSL-Anschluss der Telekom (Telekom Magenta M) mit 50/10 Mbit/s belaufen sich die monatlichen Kosten auf 39,95 € (Stand Juni 2021). Dennoch ist in den letzten Jahren eine Entwicklung zu niedrigeren Preisen, bei vergleichbar besseren Konditionen, z. B. höherem Down- und Upstream, zu beobachten [6].

Fazit: GEO-Satelliteninternet ist in Deutschland nach wie vor eine Nischentechnologie. Dies zeigt sich insbesondere an der geringen Nutzerzahl von rund 23.000. Obwohl es knapp 1 Mio. Haushalte in Deutschland gibt, die nach wie vor keine 30 Mbit/s zur Verfügung haben, wird dieser Markt bisher nicht durch das Satelliteninternet geschlossen. Weiterhin existierende Nachteile wie etwa der Installationsaufwand beim Teilnehmer, die geringe Gesamtkapazität eines Satelliten, die hohe Latenzzeit, im Vergleich zu anderen Produkten oftmals höhere Endkundenpreise bei geringeren Leistungen als auch die auf Glasfaser und Mobilfunk ausgerichteten Ausbaupläne verhindern eine Marktdurchdringung [6]. Dennoch gibt es positive Entwicklungen für Kunden und Anbieter. Im Zeitraum von 2015 bis 2018 gab es deutlich verbesserte, angebotene Leistungen, wie etwa höhere Downstream-Datenraten, Flatrate-Angebote und gestiegene Inklusivvolumen. Hinzu kommt, dass die Preise für die Endkunden deutlich sanken [6]. Es ist allerdings davon auszugehen, dass LEO-Satelliteninternet in den kommenden Jahren eine starke Konkurrenz für GEO-Satelliteninternet sein wird.

Breitband-Internetzugängen mit LEO-Satelliten gemäß dem Starlink-Konzept

In diesem Abschnitt wird zunächst das Starlink-Satelliten-Netz beschrieben. Basierend darauf erfolgt eine Analyse der Leistungsfähigkeit des Netzes. Eine ähnliche Untersuchung findet sich in Ref. [21] (durchgeführt vom Finanzanalysten Cowen) und Ref. [22], allerdings bezogen auf die USA. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Starlink keine Bedrohung für das Geschäftsmodell von bestehenden Telekommunikationsanbietern darstellt [21,22,23]. Gemäß [22] kommt es bei einer angenommenen Flottengröße von 12.000 Satelliten 2028 zu Kapazitätsengpässen. Leider ist es sehr schwierig, technische Parameter des Starlink-Netzes in Erfahrung zu

bringen bzw. die weitere Entwicklung abzusehen [22]. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt basieren auf den Werten, die in den zitierten Quellen angegeben bzw. angenommen wurden.

Starlink-Netzwerk

Das dem Starlink-Konzept zugrunde liegende Satelliten-Netzwerk wurde erstmalig im Januar 2015 öffentlich bekannt gegeben [25], um darüber Regionen einen Breitband-Internetzugang inkl. Telefonanschluss (VoIP) zu liefern, die über konventionelle Technik nicht wirtschaftlich anzubinden sind [26].

Derzeit bietet Starlink in den USA einen Beta Service für 99 \$ pro Monat zzgl. 499 \$ für das CPE mit Downstream-Bitraten im Bereich von 50 bis 150 Mbit/s und Latenzen im Bereich von 20 bis 40 ms an. Hierfür ist eine Sichtverbindung zwischen Satelliten und Empfangsantenne beim Teilnehmer erforderlich. In der Beta-Phase muss mit kurzen Ausfällen gerechnet werden, die aber mit zunehmendem Netzausbau geringer werden bzw. nicht mehr auftreten sollen. Außerdem kann es zu einer Degradation der Bitraten durch Schnee, starken Regen oder Wind kommen [27]. Derzeit nutzen nach Angaben von Starlink 69.000 Beta-Tester das Angebot. Bis Mitte 2022 sollen 500.000 zahlende Kunden das Angebot nutzen [2]. Aktuelle Speedtests ergaben mittlere Datenraten von 79 Mbit/s im Downstream und 13,8 Mbit/s im Upstream [28]. Gemäß [29] können die Datenraten mit der Zeit sehr stark variieren. Weitere Testergebnisse kann man [30] entnehmen³. In Deutschland kann man sich seit dem 10.02.2021 für den Service registrieren. Ein „erster Beta-Service“ steht seit dem 12.03.2021 in Teilen vom Westen Deutschlands zur Verfügung, soll aber rasch ausgeweitet werden [31,32,33]. Die monatlichen Kosten belaufen sich auf 99 € zzgl. 499 € für das CPE⁴, eine Anschlussgebühr von 59 € sowie 50 € für den Versand und die weitere Abwicklung [17]. Allerdings hat das Starlink CPE eine sehr hohe Leistungsaufnahme: tendenziell dauerhaft über 110 W mit Spitzenlasten bis 150 W, so dass monatlich Stromkosten in Höhe von rund 24 € hinzukommen [35]. Zum Vergleich: Deutsche Telekom, Vodafone, Telefónica und 1&1 verlangen monatlich in der Regel zwischen 30 und 40 € für einen Netzzugang mit 50 Mbit/s im Downstream [17]. Die FRITZ!Box 7590 hat beispielsweise eine Leistungsaufnahme von etwa 10 W, entsprechend Stromkosten von 26 € pro Jahr [35].

Noch 2021 soll sich die maximale Download-Geschwindigkeit auf 300 Mbit/s verdoppeln und die Latenz auf 20 ms zurückgehen⁵. Im Endausbau sollen sogar 10 Gbit/s möglich sein [36,37]. Weiterhin soll bis Ende 2021 „der Großteil der Erde“ mit dem Satelliteninternet versorgt werden können. Spätestens 2022 soll die Abdeckung dann komplett sein. Elon Musk wies zudem darauf hin, *dass Mobilfunk und damit mobiles Internet in städtischen Regionen dem Satelliten-Internet immer überlegen sein werde*. Die Versorgung mit Internet über Satelliten sei am besten für jene Regionen mit geringer bis mittlerer Bevölkerungsdichte geeignet [38]. Gemäß [24] sollen mit dem Starlink-Netz die 3 bis 4 % der Kunden angebunden werden, die mit herkömmlichen Technologien wirtschaftlich nicht erschlossen werden können. „Privatkunden sind nicht unbedingt die Kernzielgruppe für Starlink. Wichtiger sind kommerzielle Kunden – Unternehmen, die für das Internet der Dinge, autonomes Fahren oder Maschinenkommunikation ein schnelles und verlässliches Internet überall auf der Welt brauchen. Die Anwendungen werden erst einmal für kommerzielle Kunden in der Luftfahrt [39], verarbeitende Industrie oder Landwirtschaft sein.“ [33]. Auch Microsoft ist Partner von Starlink und möchte über das Starlink-Netz Satellitengänge zur Cloud-Plattform Azure vermarkten [40]. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Projekt Kuipers mit Amazon Web Services [41].

Grundsätzlich besteht das Starlink-Netz aus den folgenden Komponenten (siehe Abbildung 5):

- Satelliten

³ Gemäß [30] ergeben sich im Downstream Bitraten von 0,7 bis 209 Mbit/s (Mittelwert 103 Mbit/s) und im Upstream von 13 bis 48 Mbit/s (Mittelwert 19 Mbit/s). Die Latenzen liegen im Bereich von 15 bis 256 ms (Mittelwert 39 ms).

⁴ Allerdings scheinen die Produktionskosten für die Antenne deutlich höher zu sein. Gemäß [34] dürfte jede verkaufte Schüssel einen vierstelligen Verlust bedeuten.

⁵ Derzeit ist der Round Trip Delay gemäß Starlink in 95 % aller Fälle geringer als 31 ms [36].

- Equipment beim Teilnehmer (Customer Premises Equipment [CPE])
- Gateways (Bodenstationen)
- Anbindung der Gateways an das Internet über entsprechende Koppelpunkte (Peerings).

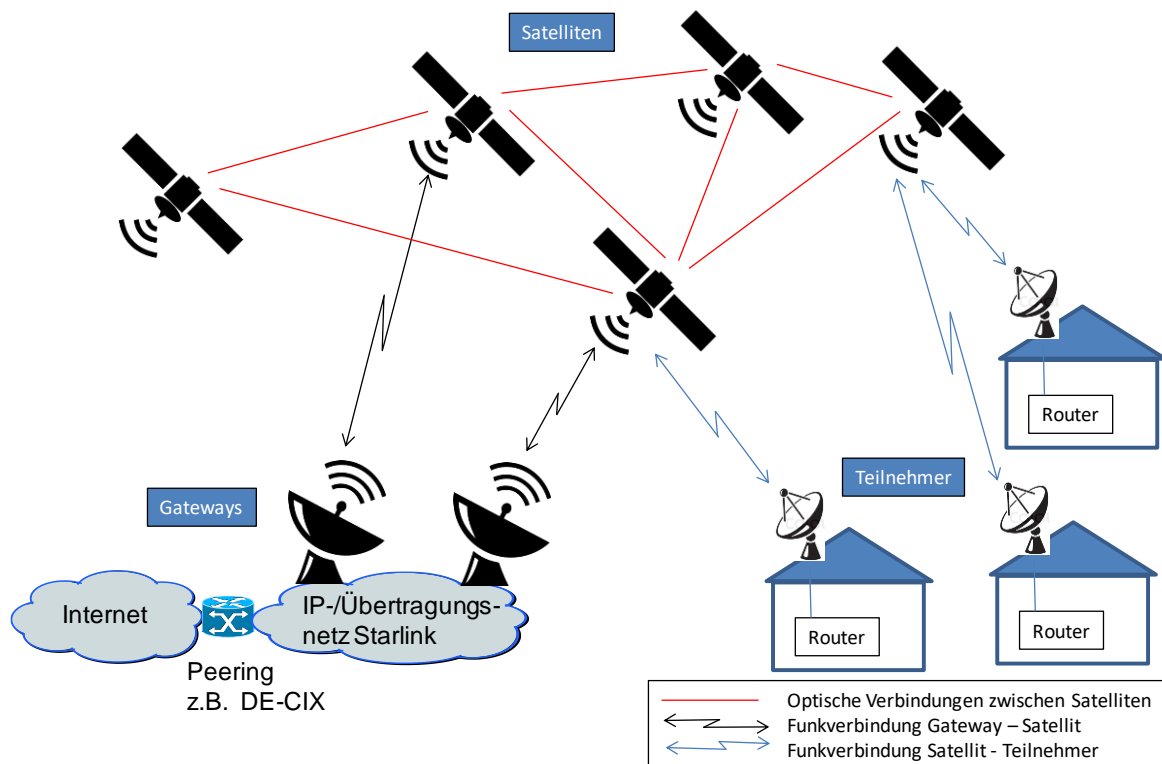


ABBILDUNG 5: STARLINK-NETZ

Während die Gateways und die Teilnehmerstationen ortsfest sind, bewegen sich die Satelliten mit einer Geschwindigkeit von 7585,16 m/s (27306,6 km/h) zu 50 % grob in eine Nord-Ost bzw. zu 50 % grob in eine Süd-Ost Richtung (vgl. Abbildung 6 bzw. [36]). Es handelt sich folglich um ein dynamisches Netz. Jeder Teilnehmer und jedes Gateway kann eine Verbindung zu genau einem Satelliten aufbauen. Die Sichtverbindung eines Satelliten zu einem Teilnehmer beträgt ca. 114 s. Spätestens danach muss eine Verbindung zu einem anderen Satelliten aufgebaut werden (Hand-Over). Die Überflugdauer eines Satelliten über Deutschland beträgt je nach zurückgelegter Strecke größenordnungsmäßig 1 min.

Satelliten

Im September 2019 hat SpaceX mit dem Aufbau von Starlink begonnen [18]. Bis 2027 hat Starlink von der US-Regulierungsbehörde FCC befristete Genehmigungen für den Start von bis zu 11.927 Satelliten erhalten. Davon wurden Stand Ende Mai 2021 1.663 bereits realisiert [9]. Ab 2021 sollen etwa alle 2 Wochen 60 Satelliten mit einer Falcon-9-Rakete in den Orbit gebracht werden [43].

Phase	Orbit shells	Number of satellites	Inclination (degrees)	Half size contractual completion time	Full size contractual completion time	Operational satellites deployed (4 March 2021)	Operational satellites deorbited (19 January 2021)
	(km)						
1	550	1584	53.0	March 2024	March 2027	1141	62
	1100	1600	53.8			0	
	1325	400	70.0			0	
	1130	374	74.0			0	
	1275	450	81.0			0	
2	335.9	2493	42.0	Nov 24	Nov 27	0	
	340.8	2478	48.0			0	
	345.6	2547	53.0			0	

TABELLE 1: ANZAHL, HÖHE UND BAHNNEIGUNG DER VON STARLINK GEPLANTEN SATELLITEN IN PHASE 1 UND 2. QUELLE: [25]

Gemäß Tabelle 1 sind in Phase 1 4.408 und in Phase 2 7.518, d.h. in Summe 11.926 Satelliten geplant. Am 17.04.2020 hat SpaceX beantragt, die 2.374 bereits genehmigten Satelliten aus Phase 1 mit Umlaufbahnen der Höhe von 1.100 bis 1.325 km auf eine Bahnhöhe von etwa 550 km (540 bis 570 km) absenken zu dürfen [25]. Abgesehen von 10 Satelliten in einer polaren Umlaufbahn mit einer Flughöhe von 560 km wurde diesem Antrag aber bisher noch nicht entsprochen [44]. Um Störungen des Nachthimmels und der Astronomie vorzubeugen [45], sollen Starlink-Satelliten ab dem neunten Start (August 2020), z.B. durch Sonnenvisiere wesentlich dunkler erscheinen. Im Juni 2020 hat SpaceX bei der ITU Spektrum im E-Band für weitere 30.000 Satelliten mit Umlaufbahnen in einer Höhe zwischen 328 bis 580 km beantragt (Phase 3 bzw. zweite Satelliten Generation) [46]. In Summe würde das Starlink-Netz im Endausbau somit fast 42.000 Satelliten umfassen:

- Phase 1 V1.0: 4.408 Satelliten (Gewicht 260 kg). Die Lebensdauer beträgt 5-7 Jahre. Nach Beendigung der Lebensdauer sollen die Satelliten beim Eintritt in die Erdatmosphäre vollständig verglühen. Nicht geklärt ist aber, ob dadurch zusätzlicher Weltraumschrott entsteht oder nicht [47,48]. Jeder Satellit ist mit 4 Phased-Array-Antennen ausgestattet, die mehrere Spot Beams unterstützen [49]. Gemäß [49] beträgt die Gesamtkapazität eines Satelliten im Downstream etwa 17 Gbit/s, gemäß [22] 17-23 Gbit/s. Entscheidend für die realisierbaren Bitraten sind vor allem die zur Verfügung stehenden Bandbreiten. Satelliten der Phase 1 verwenden Spektrum im Ku-Band (12-18 GHz) sowie im Ka-Band (27-40 GHz). Im Ka-Band stehen größere Bandbreiten zur Verfügung. Dafür ist es aber auch anfälliger für eine Dämpfung durch Wolken oder Regen [49]. In Deutschland stehen folgende Frequenzen zur Verfügung [50]:
 - Verbindung Gateway – Satellit (Ka-Band, Starlink hat in Deutschland Anträge für eine Satellitennetzteilung und für drei Gateways gestellt)
 - Downlink (Weltraum – Erde): 17,3-18,6 und 18,8-19,3 GHz, d.h. 1.800 MHz.
 - Uplink (Erde – Weltraum): 27,5-29,1 und 29,5-30 GHz, d.h. 2.100 MHz
 - Verbindung Satellit – Teilnehmer (Ku-Band) [51]
 - Downlink (Weltraum – Erde): 10,95 – 12,75 GHz, d.h. 1.800 MHz (7 Kanäle à 250 MHz)
 - Uplink (Erde – Weltraum): 14 – 14,5 GHz, d.h. 500 MHz (8 Kanäle à 62,5 MHz; EIRP 38,2 dBW; Antennengewinn 34 dBi)
- Phase 2: 7.518 Satelliten mit Spektrum im Ka- und Ku-Band sowie zusätzlich im V-Band (40-75 GHz). Die Satelliten werden Frequenzen im Bereich zwischen 37,5 bis 42 GHz für den Downlink (Weltraum – Erde) und Frequenzen im Bereich zwischen 47,2 bis 50,2 GHz und 50,4 bis 51,4 GHz für den Uplink (Erde – Weltraum) nutzen [52].

- Phase 3 (2. Generation): 30.000 Satelliten mit Spektrum im Ka- und Ku-Band sowie zusätzlich im E-Band (60-90 GHz). Die Satelliten haben eine Flughöhe von 328 km bis 614 km [53]. Die 2. Satellitengeneration wird die dreifache Kapazität der Satelliten der 1. Generation haben. Folgende Frequenzbereiche wurden beantragt [45]:
 - Verbindung Gateway – Satellit
 - Downlink (Weltraum – Erde): 17,8-18,6 GHz; 18,8-19,3 GHz; 71,0-76,0 GHz
 - Uplink (Erde – Weltraum): 27,5-29,1 GHz; 29,5-30,0 GHz; 81-86 GHz
 - Verbindung Satellit – Teilnehmer
 - Downlink (Weltraum – Erde): 10,7-12,75 GHz; 17,8-18,6 GHz; 18,8-19,3 GHz; 19,7-20,2 GHz
 - Uplink (Erde – Weltraum): 12,75-13,25 GHz; 14,0-14,5 GHz; 28,35-29,1 GHz; 29,5-30,0 GHz

Bei den 1.584 Satelliten der ersten Ausbaustufe in Phase 1 werden je 22 Satelliten wie in Abbildung 6 dargestellt auf 72 Bahnebenen der Inklination 53° verteilt. Dadurch wird eine Häufung von Satelliten über dem $53.$ Breitengrad (in Deutschland Höhe Bremen) erreicht, die in Abbildung 7 deutlich erkennbar ist (siehe auch [42]). Darüber hinaus wird deutlich, dass die Pole oberhalb bzw. unterhalb des $61.$ Breitengrades in diese Ausbaustufe nicht versorgt werden. Gemäß [54] werden für eine geringe Internetabdeckung ungefähr 400 und für eine moderate Abdeckung 800 Satelliten benötigt.

Die Satelliten sind untereinander mit max. 4 anderen Satelliten über Laserverbindungen mit Bitraten von je 10 Gbit/s symmetrisch (d.h. in Summe 40 Gbit/s [55]) verbunden (siehe Abbildung 5). Aufgrund der relativen Bewegung der Satelliten zueinander, handelt es sich um dynamische Verbindungen, die jeweils auf und wieder abgebaut werden müssen. „Keine anderen Internet-Satelliten tun dies. Sie können Breitbandressourcen in Echtzeit zuweisen und die Kapazität dort platzieren, wo sie am meisten benötigt wird. Außerdem kann das Signal von Bereichen weggeleitet werden, in denen es andere Systeme im Weltraum oder auf der Erde stören könnte.“ [56] Die Laserverbindungen wurden erstmals am 24.01.2021 realisiert [44].

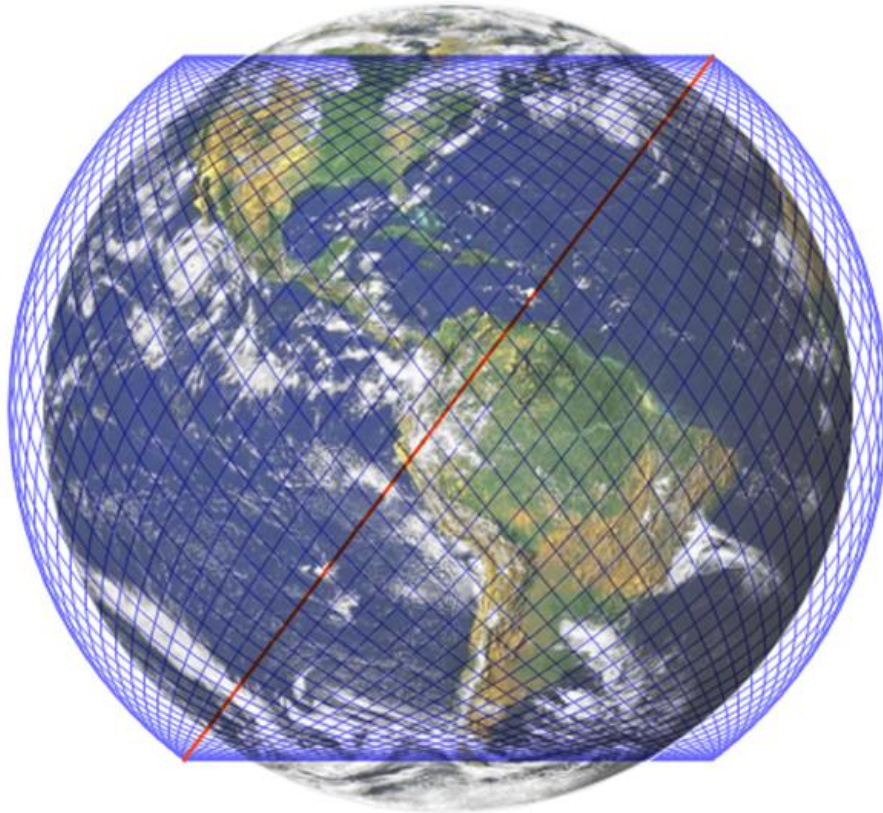


ABBILDUNG 6: UMLAUFBAHNEN DER ERSTEN AUSBAUSTUFE (PHASE 1). ES SIND 1.584 SATELLITEN IN ETWA 550 KM HÖHE VORGEGEHEN, BEI DER JE 22 SATELLITEN AUF 72 BAHNEBENEN MIT 53° INKLINATION VERTEILT WERDEN [25].

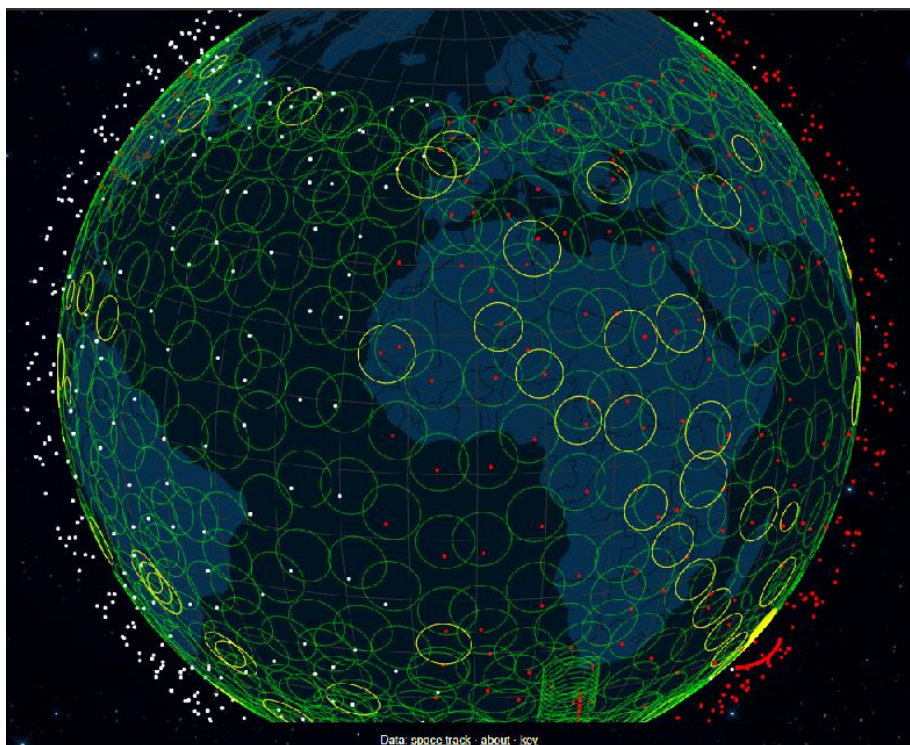


ABBILDUNG 7: POSITION UND VERSORUNGSRADIEN DER DERZEIT AKTIVEN SATELLITEN DES STARLINK-NETZES. SATELLITEN IN DER TAGZONE SIND WEIß UND SATELLITEN IN DER NACHTZONE ROT DARGESTELLT. SÜDLICH VON SÜDAFRIKA IST EINE KETTE VON SATELLITEN ZU SEHEN. HIERBEI HANDELT ES SICH UM SATELLITEN, DIE KÜRZLICH VON EINER FALCON-9-RAKETE ABGESETZT WURDEN UND SICH NOCH NICHT IN DER FINALEN UMLAUFBAHN BEFINDEN. QUELLE [43]

Die beschriebene Implementierung der Satelliten inkl. Spektrum für die Verbindungen Gateway – Satellit sowie Satellit – Teilnehmer setzt die Genehmigung der FCC voraus. Insbesondere bzgl. der Satellitenbahnen fürchten Mitbewerber wie Amazon.com (Kuiper), Kepler Communications, Pacific Dataport oder Viasat Interferenzen und sehen daher den geplanten Ausbau von Starlink kritisch [44,57].

User Terminals

Wie beim GEO-Satelliteninternet wird eine Satellitenschüssel und ein Modem benötigt. Das CPE besteht aus der Empfangsantenne (Phased Array Antenne mit einem Durchmesser von 58,42 cm und einem Gewinn von 34 dBi), Ständer, Netzteil, WLAN-Router sowie den erforderlichen Kabeln (Netzwerkkabel mit Power over Ethernet für die Verbindung Antenne – Netzteil, Netzwerkkabel für die Verbindung Netzteil – WLAN-Router sowie Stromkabel). Die Empfangsantenne ist eine der Schlüsseltechnologien des Starlink-Netztes.

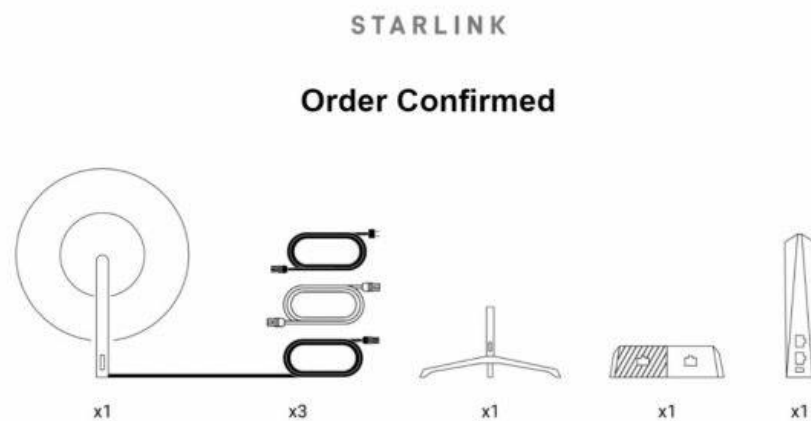


ABBILDUNG 8: CUSTOMER PREMISES EQUIPMENT VON STARLINK [31].

Die Antenne sollte an einem möglichst hohen Punkt mit freiem Sichtfeld auf die Satelliten montiert werden, was in der Regel das Hausdach sein dürfte. Die Antenne muss dann über ein Netzwerkkabel mit dem Netzteil verbunden werden, so dass hier eine entsprechende Hausverkabelung erforderlich ist. Das CPE lässt sich über eine Smartphone-App steuern.

Gateways

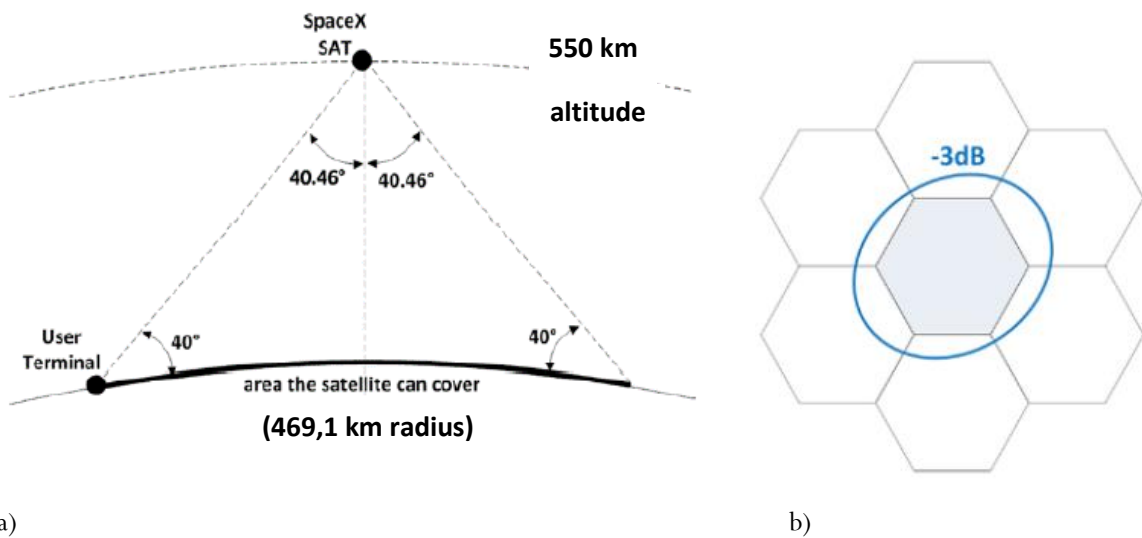
Die Gateways terminieren netzseitig die Satellitenverbindung und sind ihrerseits über Peering-Punkte mit dem Internet verbunden. An einem Gateway-Standort befinden sich in der Regel mehrere Antennen (Größenordnung 10, maximal 30 [58]), wobei jede Antenne genau eine Verbindung mit einem Satelliten etablieren kann. Gemäß [43] gibt es derzeit 58 Gateways, davon 56 in den USA und 2 in Frankreich (siehe Abbildung 9). Darüber hinaus sind in Deutschland derzeit drei Gateway-Standorte in Betrieb, eine davon ist die Erdfunkstelle Usingen [50]. In Phase 3 sind gemäß Starlink in den USA einige Hundert Gateways mit Parabolantennen erforderlich, die in der Nähe von größeren Internet-Koppelpunkten errichtet werden sollen. Die genaue Anzahl der derzeitigen Gateways sowie die weitere Planung ist jedoch nicht bekannt. Gemäß [58] werden für die Phase 1 123 Gateways mit je 30 Antennen benötigt.



ABBILDUNG 9: GATEWAYS IN DEN USA (BRAUN DARGESTELLT). QUELLE [43]

Kapazität eines Satelliten

Der primäre Flaschenhals beim Satelliteninternet ist in der Regel die Verbindung Satellit – Teilnehmer. Ein Weiterer kann die Verbindung Satellit – Gateway sein. In diesem Abschnitt soll die Kapazität eines Starlink-Satelliten der Phase 1 in Richtung Teilnehmer (Up- und Downstream) im Sinne einer Best-Case-Betrachtung nach oben abgeschätzt werden.



a) ABILDUNG 10: A) MÖGLICHE VERSORGUNGSFLÄCHE EINES SATELLITEN, B) VERSORGUNGSFLÄCHE EINES SPOT BEAMS. QUELLE: [60]

Abbildung 10 zeigt die Fläche, die ein einzelner Satellit versorgen kann (a) sowie die tatsächliche Versorgungsfläche eines einzelnen Spot Beams (b) (hellblau). Das Konzept ist ähnlich wie bei Mobilfunkzellen. Die Antennen können den Strahl in einem Bereich von $\pm 40,46^\circ$ zum Lot in Richtung Teilnehmer lenken [59]. Bei einer Flughöhe von 550 km kann der Satellit Teilnehmer in einem Radius von 469,1 km entsprechend einer Fläche von $691.265,7 \text{ km}^2$ versorgen. Die Oberfläche der Erde beträgt $510.064.472 \text{ km}^2$, so dass für eine Versorgung der Erde $510.064.472 \text{ km}^2 / 691.265,7 \text{ km}^2 = 738$ Satelliten erforderlich wären. Die Fläche von Deutschland beträgt 357.582 km^2 , so dass in diesem Fall ein einziger Satellit ausreichend wäre.

Die tatsächliche Fläche, die ein Satellit *gleichzeitig* versorgen kann, ist jedoch deutlich geringer. Jeder Satellit kann typischerweise 8 Spot Beams aussenden [58], von denen zumindest in Deutschland aufgrund der Frequenzuteilung der BNetzA [60] nur 7 verwendet werden können. Der Öffnungswinkel eines Spot Beams beträgt $2,5^\circ$ [59], so dass jeder Spot Beam bei einer Flughöhe von 550 km eine Fläche mit einem Radius von 12 km bzw. einem Flächeninhalt von $452,5 \text{ km}^2$ beleuchten kann [siehe Abbildung 10 b)]. Bei 7 Spot Beams pro Satellit kann folglich ein einzelner Satellit jeweils $7 \times 452,5 \text{ km}^2 = 3.167,3 \text{ km}^2$ (Überlappungen nicht mitgerechnet), d.h. nur etwa 0,46 % der theoretisch möglichen Versorgungsfläche ($691.265,7 \text{ km}^2$), gleichzeitig beleuchten. Zu versorgende Teilnehmer außerhalb der von den Spot Beams aktuell beleuchteten Fläche müssen dann im Zeitmultiplexverfahren bedient werden, in dem die Spot Beams anschließend auf diese Teilnehmer fokussiert werden. Die Gesamtkapazität aller Teilnehmer innerhalb der vom Satelliten versorgten Fläche reduziert sich dann entsprechend.

Eine obere Grenze für die Bitrate eines Funkkanals ist durch die Kanalkapazität B_{max} gegeben. Für ein frequenzunabhängiges Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) gilt:

$$B_{max} = \Delta f \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

mit der Kanalbandbreite Δf und $SNR = P_E / (k_B T \Delta f)$. P_E bezeichnet die Empfangsleistung, k_B die Boltzmann-Konstante und T die effektive Rauschtemperatur des Empfängers. Gl. (1) beschreibt die theoretische Obergrenze für die realisierbaren Bitraten. Moderne Übertragungsverfahren kommen jedoch recht nahe an diese Obergrenze heran. Die Empfangsleistung ist gegeben durch:

$$P_E = EIRP \cdot G_{iso,E} \left(\frac{c_0}{4\pi f r} \right)^2 L_a \quad (2)$$

Dabei bezeichnet:

- EIRP: Equivalent Isotropic Radiative Power des Senders (Sendeleistung multipliziert mit dem Gewinn der Sendeantenne)
- $G_{iso,E}$: Gewinn der Empfangsantenne
- c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)
- f : Funkfrequenz
- r : Abstand Sendeantenne - Empfänger
- L_a : Zusatzdämpfung durch die Atmosphäre

Mit den Gleichungen (1) und (2) lässt sich die Bitrate der Verbindung Satellit – Teilnehmer im Downlink (Richtung Weltraum – Erde) und Uplink (Richtung Erde – Weltraum) bestimmen. Die angenommenen Werte sowie die Ergebnisse zeigt Tabelle 2.

Richtung	Downlink	Uplink
Δf	250 MHz [60]	62,5 MHz [60]
f	12 GHz [60]	14,25 GHz [60]
EIRP	36,7 dBW [58]	38,2 dBW [60]
$G_{sio,E}$	34 dBi [50]	37,1 dBi [58] bzw. 42,7 dBi [59]
r	550 bis 723 km ⁶	550 bis 723 km
L_a	0,53 dB ⁷ [58]	0,53 dB ⁷ [58]
T	362,9 K [58]	535,9 K [58]
B_{max}	1,7 Gbit/s	693 Mbit/s
Spektrale Effizienz	6,8 bit/s/Hz	11 bit/s/Hz

TABELLE 2: ANGENOMMENE PARAMETER UND BITRATEN FÜR EINEN SPOT-BEAM FÜR DIE VERBINDUNG SATELLIT – TEILNEHMER IM DOWNLINK SOWIE IM UPLINK.

Für die Berechnungen wurden jeweils die günstigsten Werte angenommen (Best Case). Mit 8 Spot Beams ergibt sich für einen Satelliten eine Gesamtkapazität von rund 14 Gbit/s für den Downlink und 5,5 Gbit/s für den Uplink. Die Bitraten für den Uplink entsprechen etwa 40 % der Downlink-Bitraten.

Gemäß Starlink beträgt die Gesamtkapazität eines Satelliten im Downstream 17 Gbit/s [49]. In [58] wird die Gesamtkapazität mit 21,4 Gbit/s und in [22] mit 17-23 Gbit/s angegeben. Größenordnungsmäßig passen die hier anhand des sehr einfachen Modells abgeschätzten Datenraten daher zu den Werten aus Ref. [22,49,58]. Im Folgenden wird angenommen, dass die Kapazität der Satelliten der Phase 2 die gleiche Kapazität wie Satelliten der Phase 1 und Satelliten der Phase 3 die dreifache Kapazität wie Satelliten der Phase 1 haben [53].

Kapazität eines Gateways

Ein weiterer Flaschenhals kann die Verbindung Satellit – Gateway sein. In diesem Abschnitt soll die Kapazität der Verbindung Gateway - Satellit (Up- und Downlink) mit den Gleichungen (1) und (2) im Sinne einer Best-Case Betrachtung nach oben abgeschätzt werden. Die angenommenen Werte sowie die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.

Richtung	Downlink	Uplink
Δf	250 MHz [58]	500 MHz [58]
f	18,5 GHz [58]	28,5 GHz [58]
EIRP	39,44 dBW [58]	68,4 dBW [58]
$G_{sio,E}$	41 dBi [58]	40,9 dBi [58]
r	≥ 550 km	≥ 550 km
L_a	2,9 dB ⁷ [58]	2,9 dB ⁷ [58]
T	362,9 K [58]	535,9 K [58]
B_{max}	2 Gbit/s	7,4 Gbit/s
Spektrale Effizienz	7,9 bit/s/Hz	14,8 bit/s/Hz

TABELLE 3: ANGENOMMENE PARAMETER UND BITRATEN FÜR EINEN FUNKKANAL FÜR DIE VERBINDUNG GATEWAY – SATELLIT IM DOWNLINK SOWIE IM UPLINK.

Aufgrund der Best Case Betrachtung ergeben sich hier deutlich höhere Werte als in [58], wo für den Uplink eine Bitrate von 2,7 Gbit/s entsprechend einer spektralen Effizienz von 5,4 bit/s/Hz ermittelt wurden.

⁶ 550 km ergeben sich, wenn sich der Satellit genau über dem Teilnehmer befindet. 723 km ergeben sich, wenn sich der Teilnehmer aus Sicht des Satelliten in einem Winkel von $40,46^\circ$ zum Lot befindet.

⁷ Hinzu kommt noch die Dämpfung etwa durch Wolken und Regen, die hier im Sinne einer Best-Case Betrachtung nicht berücksichtigt wird. Die Dämpfung durch Wolken/Regen hängt stark vom Ort und der Elevation des Satelliten ab. Für München und einen GEO Satelliten bei 9° E beträgt die Elevation $34,68^\circ$. Für eine Verfügbarkeit von 99 % ergibt sich beispielsweise ein Dämpfungswert von 1,2 dB@14 GHz und 5 dB@28 GHz.

Gemäß [58] können für den Uplink insgesamt 8x500 MHz Kanäle und im Downlink 9x250 MHz Kanäle verwendet werden, so dass sich für den Uplink eine Gesamtdatenrate von 59,1 Gbit/s und für den Downlink eine Gesamtdatenrate von 17,8 Gbit/s ergibt. Die Downlink-Kapazität entspricht für ein Gateway daher nur etwa 30 % der Uplink-Kapazität.

Kapazität des Starlink-Satelliten-Netzes

In diesem Abschnitt soll die Kapazität des gesamten Starlink-Netzes nach Abschluss der verschiedenen Phasen weltweit und deutschlandweit abgeschätzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass der limitierende Faktor die Verbindung Satellit – Teilnehmer ist. Dies ist typischerweise der Fall, wenn die Daten vom Gateway über nur einen Satelliten direkt an den Teilnehmer gesendet werden und das Gateway die Datenrate nicht begrenzt. Für die Abschätzung werden einmal konservative und einmal optimistische Werte für die entsprechenden Parameter angenommen.

Kapazität Starlink im Downstream	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Globale Betrachtung			
Anzahl Satelliten pro Phase	4.408	7.518	30.000
Kapazität Satellit [Gbit/s]	17	17	51
Gesamtkapazität Phase 1 bis 3 [Gbit/s]	74.936	202.742	1.732.742
Betrachtung Deutschland			
Versorgungsfläche Satelliten [km ²]	446.112.439	446.112.439	510.064.472
Fläche Deutschland [km ²]	357.582	357.582	357.582
Anzahl Satelliten pro Phase (Gleichverteilung)	3,5	6,0	21,0
Erhöhungsfaktor für Deutschland	4	3	2
Anzahl Satelliten pro Phase	14,1	18,1	42,1
Gesamtkapazität Deutschland [Gbit/s]	240	548	2693
Überbuchung	20	20	20
Downstream Bitrate / User [Gbit/s]	0,1	0,1	0,1
Anzahl User 100 Mbit/s	48.052	109.518	538.562
Downstream Bitrate / User [Gbit/s]	1	1	1
Anzahl User 1 Gbit/s	4.805	10.952	53.856
Downstream Bitrate / User [Gbit/s]	10	10	10
Anzahl User 10 Gbit/s	481	1.095	5.386

TABELLE 4: KAPAZITÄTEN DES STARLINK-NETZES WELTWEIT UND DEUTSCHLANDWEIT (KONSERVATIVE ANNAHMEN). NACH ABSCHLUSS DER PHASE 2 ERGEBEN SICH INSGESAMT 11.926 UND NACH ABSCHLUSS DER PHASE 3 41.926 SATELLITEN. ANGEGEBEN SIND JEWEILS DIE BITRATEN IM DOWNSTREAM. DIE UPSTREAM-BITRATEN ENTSPRECHEN MAX. 40 % DER DOWNSTREAM-BITRATEN.

Kapazität Starlink im Downstream	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Globale Betrachtung			
Anzahl Satelliten pro Phase	4.408	7.518	30.000
Kapazität Satellit [Gbit/s]	23	23	69
Gesamtkapazität Phase 1 bis 3 [Gbit/s]	101.384	274.298	2.344.298
Betrachtung Deutschland			
Versorgungsfläche Satelliten [km ²]	446.112.439	446.112.439	510.064.472
Fläche Deutschland [km ²]	357.582	357.582	357.582
Anzahl Satelliten pro Phase (Gleichverteilung)	3,5	6,0	21,0
Erhöhungsfaktor für Deutschland	4	4	4
Anzahl Satelliten pro Phase	14,1	24,1	84,1
Gesamtkapazität Deutschland [Gbit/s]	325	879	6684
Überbuchung	20	20	20
Downstream Bitrate / User [Gbit/s]	0,1	0,1	0,1
Anzahl User 100 Mbit/s	65.012	175.891	1.336.834
Downstream Bitrate / User [Gbit/s]	1	1	1
Anzahl User 1 Gbit/s	6.501	17.589	133.683
Downstream Bitrate / User [Gbit/s]	10	10	10
Anzahl User 10 Gbit/s	650	1.759	13.368

TABELLE 5: KAPAZITÄTEN DES STARLINK-NETZES WELTWEIT UND DEUTSCHLANDWEIT (OPTIMISTISCHE ANNAHMEN). NACH ABSCHLUSS DER PHASE 2 ERGEBEN SICH INSGESAMT 11.926 UND NACH ABSCHLUSS DER PHASE 3 41.926 SATELLITEN. ANGEGEBEN SIND JEWEILS DIE BITRATEN IM DOWNSTREAM. DIE UPSTREAM-BITRATEN ENTSPRECHEN MAX. 40 % DER DOWNSTREAM-BITRATEN.

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse. Um aus der Gesamtkapazität des Netzes die max. mögliche Teilnehmerzahl zu ermitteln, wurde eine Überbuchung von 1:20 angenommen (d.h. für einen 100 Mbit/s-Anschluss eine Planbitrate von 5 Mbit/s pro Teilnehmer⁸, für einen 1 Gbit/s-Anschluss eine Planbitrate von 50 Mbit/s pro Teilnehmer und für einen 10 Gbit/s-Anschluss eine Planbitrate von 500 Mbit/s pro Teilnehmer). Die Planbitraten entsprechen den minimalen Bitraten. Die typischen Bitraten sind durch die in Tabelle 4 und Tabelle 5 angegebenen Bitraten gegeben. Die maximal mögliche Bitrate entspricht der Bitrate eines Spot Beams (1,7 Gbit/s bis 2,9 Gbit/s für Satelliten der Phase 1 und 2).

Bei der Versorgungsfläche der Satelliten wurde angenommen, dass in Phase 1 und 2 die Polflächen, d.h. die Flächen ober- bzw. unterhalb des 61. Breitengrades nicht versorgt werden (siehe Abbildung 6), wohingegen in Phase 3 die gesamte Erdoberfläche versorgt wird. Bei der deutschlandweiten Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass sich die Satelliten nicht gleichmäßig auf die Versorgungsfläche verteilen. Durch die Bahnneigung (53° für die ersten 1.584 Satelliten) ergibt sich an einigen Stellen (53. Breitengrad bei einer Bahnneigung von 53°) eine deutlich höhere Satellitendichte als an anderen. Dies wurde durch den Erhöhungsfaktor in Tabelle 4 und Tabelle 5 berücksichtigt, der wie folgt abgeschätzt wurde: Die derzeitige Anzahl der Satelliten über Deutschland ändert sich alle paar Minuten im Bereich zwischen 2 und 6 [43]. Bei einer Gleichverteilung aller derzeitigen Satelliten müssten sich über Deutschland 1,1 Satelliten befinden. Tatsächlich sind es im Mittel etwa 3, woraus sich ein Erhöhungsfaktor von etwa 3 ergibt. In Tabelle 4 und Tabelle 5 wurden sogar höhere Werte zugrunde gelegt.

Die Gesamtkapazität des Netzes beträgt in Phase 1 mit den konservativen Annahmen rund 75 Tbit/s im Downstream. Dieser Wert ist deutlich höher als der in Ref. [58] angegebene Wert von 23,7 Tbit/s. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Gesamtkapazität des Netzes gemäß Ref. [58] durch die Verbindung Gateway – Satellit begrenzt ist. Gemäß [61] visiert Starlink weltweit insgesamt 40 Mio. Kunden an und möchte damit einen

⁸ In [22] wurde eine Planbitrate von 3,6 Mbit/s pro Teilnehmer angenommen.

Umsatz von 30 Mrd US-\$ generieren (entspricht einem ARPU von 62,5\$ pro Monat), was als durchaus realistisch erscheint. Ein Teil dieses Umsatzes wird dabei auch durch staatliche Förderprogramme generiert (vgl. z.B. [22]).

In Deutschland lassen sich nach Abschluss der Phase 3 selbst mit optimistischen Annahmen max. 1,34 Mio. 100 Mbit/s-Anschlüsse; 134.000 1 Gbit/s-Anschlüsse bzw. 13.400 10 Gbit/s Anschlüsse realisieren. Diese Betrachtungen machen deutlich, dass selbst bei 100 Mbit/s-Anschlüssen der maximale Marktanteil bei rund 3 % liegen kann. Wollte man andererseits alle rund 40 Mio. Haushalte in Deutschland mit dem Starlink-Netz versorgen, so ergäbe sich pro Teilnehmer eine minimale Bitrate (Planbitrate) von nur 167 kbit/s. Zum Vergleich: bei GPON (Splitverhältnis 1:32) ergibt sich pro Teilnehmer im Downstream eine minimale Bitrate von über 70 Mbit/s, d.h. eine um den Faktor 421 höhere minimale Bitrate.

Auch Satelliteninternet mit dem Starlink-Netz wird daher bzgl. Breitbandinternet eine Nischentechnologie sein, etwa für die Versorgung von derzeit mit bestehenden Technologien weder wirtschaftlich noch mit Fördermitteln erschließbaren Teilnehmern.

Die Studie [62] kommt zu ähnlichen Ergebnissen für die USA. Gemäß [62] werden mit dem Starlink-Netz nach Abschluss der Phase 2 (nicht vor Ende 2026) 485.000 simultane 100 Mbit/s-Verbindungen möglich sein. Bei einer Überbuchung von 1:3 können dann rund 1,5 Mio. Teilnehmer versorgt werden [62]. Gemäß der Studie [63] können mit dem Starlink-Netz nach Abschluss der Phase 2 300.000 bis 800.000 Haushalte in den USA (entsprechend einem Marktanteil von weniger als 1 %) versorgt werden.

Latenz

Die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum beträgt $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ m/s. Während die Latenz für GEO-Satelliten für die Strecke Gateway – Satellit – Teilnehmer im Bereich von 240 bis 250 ms liegt, liegt sie bei LEO-Satelliten in einer Höhe von 550 km im besten Fall (Satellit befindet sich genau über dem Teilnehmer sowie dem Gateway) bei $2 \times 550 \text{ km} / 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3,7 \text{ ms}$ und im schlechtesten Fall (Teilnehmer und Gateway befinden sich in einem Winkel von $40,46^\circ$ zum Satelliten) bei $2 \times 723 \text{ km} / 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 4,8 \text{ ms}$. Hierbei wurde angenommen, dass sich sowohl der Teilnehmer als auch das Gateway im Sichtbereich des Satelliten befinden und dass der Satellit die Signale an das nächstgelegene Gateway schickt. Möglich wäre auch eine Weiterleitung der Teilnehmer-Signale über Laserlinks an andere Satelliten, die dann erst die Signale an ein Gateway leiten [64]. In Bezug auf das Routing sowie das Traffic-Engineering im Starlink-Netz gibt es leider keine Angaben. Um sowohl die Netzkanten (Laserlinks) als auch die Netzknoten (Satelliten) möglichst wenig zu belasten, kann angenommen werden, dass ein Shortest Path Routing, ähnlich zu dem im Internet, verwendet wird. Da die Signalgeschwindigkeit in Vakuum ($c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ m/s) größer als in einem Lichtwellenleiter ist ($c_0/N = 2,04 \cdot 10^8$ m/s mit dem Gruppenindex $N=1,47$), kann es jedoch sinnvoll sein, für low-latency-Verbindungen die Signale zunächst über Satelliten und dann erst an ein Gateway in der Nähe des Ziel-Peering-Punktes weiterzuleiten [64]. Dies soll im Folgenden näher betrachtet werden.

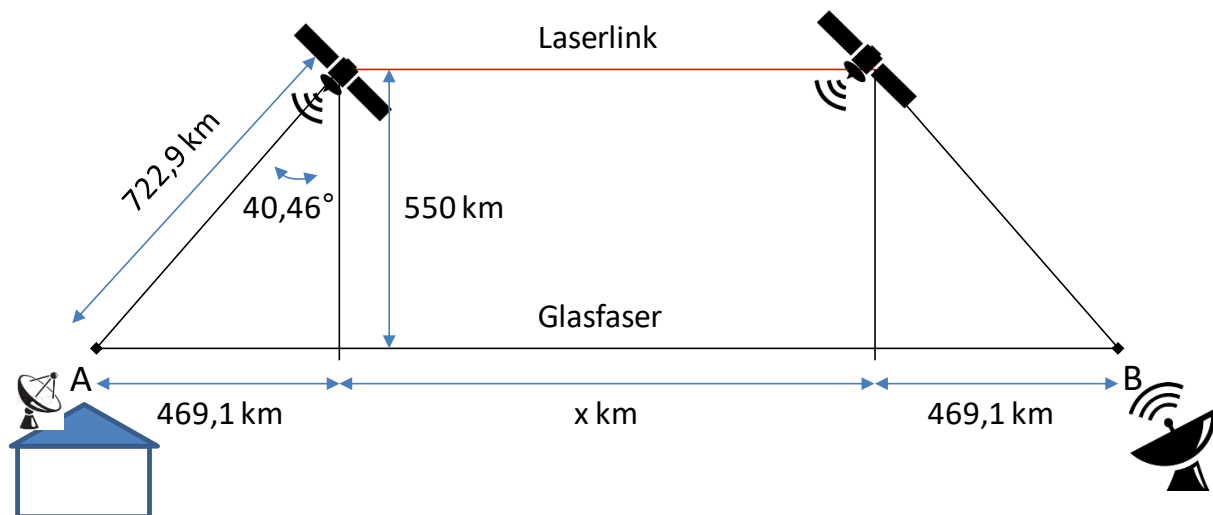


ABBILDUNG 11: VERGLEICH DER LATENZEN FÜR EINE GLASFASERVERBINDUNG SOWIE EINE SATELLITENVERBINDUNG.

In Abbildung 11 soll die Laufzeit einer Satellitenverbindung zwischen zwei Punkten A und B (Entfernung $x \text{ km} + 2 \cdot 469,1 \text{ km}$) mit der einer Glasfaserverbindung verglichen werden. Betrachtet wird hier rein die physikalische Signallaufzeit und keine Verarbeitungszeiten durch Netzknoten (Satelliten bzw. optische Netzknoten). Für die Satellitenverbindung wird der günstigste Fall angenommen, d.h. dass sich Teilnehmer und Gateway in einem Winkel von $40,46^\circ$ zum Satelliten befinden. Aufgrund der geringen Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Glasfaser ist die Latenz für $x > 141,7 \text{ km}$ für die Satellitenverbindung geringer. Für $x = 141,7 \text{ km}$ ergibt sich sowohl für die Satelliten- als auch für die Glasfaserverbindung eine Latenz von $5,3 \text{ ms}$ bzw. ein Round Trip Delay von $10,6 \text{ ms}$. D.h. für Glasfaserstrecken mit einer maximalen Länge von etwa 1.080 km ist die Latenz für die Glasfaserverbindung geringer, darüber hinaus ist die Latenz für die Satellitenverbindung geringer. Da sowohl Glasfaser- als auch Satellitenverbindungen nicht entlang der Luftlinie verlaufen, ist die geographische Entfernung (Luftlinie) kleiner.

Befindet sich sowohl der Teilnehmer als auch der Ziel-Server innerhalb von Deutschland, so ist die Latenz für die Glasfaserverbindung selbst im ungünstigsten Fall (z.B. Teilnehmer und Ziel-Server befinden sich in Berlin und der Netzkoppelpunkt in Frankfurt entsprechend einer Entfernung von etwa 1.100 km) geringer als für die Satellitenverbindung.

Anders sieht es für europaweite Verbindungen aus. Befindet sich der Teilnehmer in Berlin und der Zielservers in Amsterdam (Entfernung etwa 660 km), so ist die Latenz für die Glasfaserverbindung noch geringer. Befindet sich hingegen der Teilnehmer in Berlin und der Zielservers in Dublin (Entfernung 1.620 km), Madrid (Entfernung 2.325 km) oder Rom (Entfernung 1.500 km), so ist die Latenz für die Satellitenverbindung geringer. Für die Strecke Berlin – Madrid ergibt sich mit dem o.a. Modell eine Latenz von $11,4 \text{ ms}$ (Round Trip Delay $22,8 \text{ ms}$) für die Glasfaserverbindung und $4,6 \text{ ms}$ (Round Trip Delay $9,2 \text{ ms}$) für die Satellitenverbindung. Voraussetzung ist allerdings, dass hierbei die Signale wie oben beschrieben so weit wie möglich im Satellitennetz übertragen werden.

Noch größer fällt der Unterschied für Interkontinentalverbindungen aus. Genauere Modelle [42,64] kommen zu folgenden Round Trip Delays:

- Verbindung London –New York [42,64]
 - 43 ms Round Trip Delay mit Starlink
 - 55 ms Round Trip Delay mit einer kürzest möglichen Glasfaserverbindung (fiktiv)
 - 76 ms Round Trip Delay über das Unterseekabel AC-2 (6400 km Länge; $62,7 \text{ ms}$ für die Signallaufzeit zzgl. $13,3 \text{ ms}$ für die Signalverarbeitung)
- Verbindung NNJ4 Rechenzentrum in New Jersey (USA) – Rechenzentrum LD4 in Slough (UK) [42]

- 65 ms Round Trip Delay über das Unterseekabel AC-1
- 59,95 ms Round Trip Delay über das Hibernia Express Cable (derzeit die schnellste Verbindung zwischen den beiden Rechenzentren)
- Verbindung London – San Francisco [64]
 - 75 ms Round Trip Delay mit Starlink
 - 86 ms Round Trip Delay mit einer kürzestmöglichen Glasfaserverbindung (fiktiv)
 - 146 ms Round Trip Delay über das existierende Internet
- Verbindung London – Singapur [64]
 - 90 ms Round Trip Delay mit Starlink
 - 108 ms Round Trip Delay mit einer kürzestmöglichen Glasfaserverbindung (fiktiv)
 - 159 ms Round Trip Delay über das existierende Internet
- Verbindung London – Johannesburg [64]
 - 110 ms Round Trip Delay mit Starlink
 - 90 ms Round Trip Delay mit einer kürzestmöglichen Glasfaserverbindung (fiktiv)
 - 190 ms Round Trip Delay über das existierende Internet

Es wird deutlich, dass mit dem Starlink-Netz Interkontinentalverbindungen mit einer z.T. erheblich geringeren Latenz als mit Glasfaserkabeln realisiert werden können, wobei aufgrund der Satelliten-Konstellation Ost-West-Verbindungen günstiger als Nord-Süd-Verbindungen sind [64].

Verfügbarkeit

In [65] wird für GEO-Satelliteninternet für Privatkunden eine mittlere Verfügbarkeit von 97,0 % im Jahresdurchschnitt angegeben. Weiterhin heißt es: „Durch witterungsbedingte Einflüsse kann es zu weiteren Einschränkungen bei der Verfügbarkeit kommen, auf die die skyDSL Deutschland keinen Einfluss hat.“ [65]. Die genannte Verfügbarkeit ist jedoch nicht auf das Starlink-Netz übertragbar. Beim GEO-Satelliteninternet gibt es nur einen Satelliten und vermutlich nur wenige Gateways.

Im Gegensatz dazu besteht das Starlink-Netz im Endausbau aus mehreren Hunderten wenn nicht sogar mehreren Tausend weltweit verteilten Gateways und fast 42.000 Satelliten, die untereinander mit bis zu 4 Laserlinks vermascht sind. Es handelt sich folglich um ein dynamisches Netz mit extrem vielen Netzknoten und einem hohen Vermaschungsgrad. Ein entsprechendes Routing bzw. Traffic Engineering vorausgesetzt, kann damit prinzipiell ein extrem hochverfügbares Netz realisiert werden⁹. Die Verfügbarkeit des Starlink-Netzes wird bestimmt durch die Verfügbarkeit der Netzknoten (Satelliten), der Erdfunkstellen (Gateways, CPE) sowie der Netzkanten (Verbindung Gateway – Satellit, Satellit – Satellit und Satellit – Teilnehmer). Angaben bzgl. der Verfügbarkeit des Starlink-Netzes gibt es derzeit nicht. Es sind jedoch folgende Informationen verfügbar:

- Satelliten:
 - Gemäß [66] wurden innerhalb von etwa einem Jahr (September 2019 bis 06.10.2020) 47 von insgesamt 775 Satelliten entweder absichtlich oder aufgrund von Ausfällen außer Betrieb genommen. Visat behauptet, dass Starlink-Satelliten eine In-Orbit-Ausfallrate von 7 % hätten, die weit über den von SpaceX behaupteten Ausfallraten von weniger als 1 % liege. Eine so hohe tatsächliche Ausfallrate, impliziere optimistisch geschätzt eine Ausfallrate von 22 % über die Dauer der Starlink-Mission [66].
 - Satelliten können sich autonom bewegen, um Kollisionen mit Weltraummüll und anderen Raumfahrzeugen zu vermeiden, indem sie Eingaben aus dem Trümmerverfolgungssystem des

⁹ Traffic Engineering wird realisiert durch Navigationssensoren, so genannte „Star Tracker“, die jedem Satelliten seine Fluglage mitteilen [56].

Verteidigungsministeriums verwenden [54]. Dennoch kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass Satelliten durch Kollisionen mit Weltraummüll oder anderen Satelliten zerstört werden. Dabei könnte es prinzipiell auch zu einer Kettenreaktion kommen, bei der zerstörte Satelliten weitere Satelliten zerstören und es schließlich zu einem Ausfall des gesamten Satellitennetzes kommt (Kessler-Syndrom). Eine Wahrscheinlichkeit für die Zerstörung eines oder mehrerer Satelliten durch Weltraummüll oder für die Zerstörung des gesamten Netzes kann derzeit nicht angegeben werden¹⁰. Klar ist aber, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit ohne aktives Entfernen von Weltraummüll künftig deutlich ansteigen wird [67,68]. Es gibt zwar täglich mehrere Kollisionswarnungen, zu Ausweichmanövern kommt es aber nur etwa 2 bis 3 mal pro Jahr [68]. Seit 2020 gab es bereits mehrere Beinahe-Kollisionen zwischen Satelliten [70,71].

- LEO-Satelliten befinden sich unterhalb des Van Allen Belts, welcher die energiegeladenen Teilchen des Sonnenwinds hält. Die Komponenten der LEO-Satelliten sind daher einigermaßen geschützt. In der Regel müssen LEO-Satelliten weniger strahlungsgeschützt werden als z.B. GEO-Satelliten.
- Ausfall von Satelliten durch Hackerangriffe: keine Angaben. Bei einer physikalischen Trennung der IP-Ebene von der Steuerungsebene (Telemetrie) der Satelliten ist jedoch davon auszugehen, dass ein Satellit nicht durch einen Hackerangriff betriebsunfähig gemacht werden kann. Im Gegensatz dazu kann natürlich die IP-Ebene wie jeder IP-Router gehackt und damit betriebsunfähig gemacht werden.
- Durchaus möglich ist eine Störung der Telemetrie- und/oder Datenkanäle der Satelliten durch entsprechende Störsender. Dadurch können Satelliten betriebsunfähig gemacht werden.
- Aufgrund der hohen Anzahl von Satelliten kann der Verkehr von ausgefallenen Satelliten durch andere Satelliten übernommen werden, wobei sich natürlich die Kapazität des Netzes entsprechend reduziert.
- Derzeit werden etwa alle 2 Wochen 60 Starlink Satelliten mit einer Falcon-9-Rakete in den Orbit gebracht. Daher ist davon auszugehen, dass ausgefallene Satelliten schnell ersetzt werden können.
- CPE: keine Angaben. Die Teilnehmerantenne ist allerdings für einen Temperaturbereich von -30 bis +40° spezifiziert und arbeitet oberhalb von +40° nicht mehr [72].
- Gateway: keine Angaben. An jedem Gateway-Standort befinden sich jedoch mehrere Antennen, so dass bei Ausfall einer oder mehrerer Antennen immer noch eine Verbindung zum Satelliten besteht, jedoch mit reduzierter Datenrate. Allerdings kann es etwa durch Stromausfall (der nicht überbrückt werden kann) oder Brand zu einem Komplettausfall des Gateways kommen.
- Verbindung Satellit – Teilnehmer. Die Verfügbarkeit der Verbindung Satellit – Teilnehmer erfolgt im Ku-Band und ist daher von der Dämpfung durch die Atmosphäre sowie vom Wetter (Schnee, Regen, Nebel, Wind) abhängig. Gemäß Starlink kann es zu einer Degradation der Bitraten durch Schnee,

¹⁰ Derzeit befinden sich 6.000 Objekte mit einer Größe von mehr als 1 m, 20.000 Objekte mit einer Größe von mehr als 10 cm und etwa 1 Mio. Objekte mit einer Größe von mehr als 1 cm im Orbit. 2/3 der Objekte befinden sich dabei im LEO. Jeder Satellit, der von einem Objekt von mehr als 1 cm Größe getroffen wird, geht verloren [67]. Objekte mit einer minimalen Größe von 2 cm können von der Erde noch verfolgt werden [68] und Kollisionen mit solchen Objekten daher vermieden werden. Der ESA-Satellit Sentinel-1A wurde im Zeitraum April 2014 – August 2016 von einem ca. 2mm großen Objekt getroffen und dadurch das Solarpanel beschädigt. Durch die Kollision wurden Trümmer aus dem Solarpanel herausgebrochen, die sich nun im Orbit befinden und ihrerseits weitere Kollisionen auslösen können [67]. Ohne ein aktives Entfernen wird die Zahl der Objekte im Orbit mit einer Größe von mehr als 10 cm durch Kollisionen untereinander stark zunehmen [67]. Modelle gehen davon aus, dass es alle 5-10 Jahre zu einer von Weltraummüll ausgelösten Kollision im Orbit kommen wird [68]. Gemäß [69] gibt es seit zwei Jahrzehnten im Schnitt mehr als 12 sogenannte Fragmentationsereignisse pro Jahr, also Begebenheiten, bei denen viele Fragmente entstehen. Davon hätten sich bislang etwa 550 ereignet, bei denen Millionen Trümmerteile entstanden seien.

starken Regen oder Wind kommen [27]. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte für die Dämpfung durch die Atmosphäre gelten für eine Verfügbarkeit von 99 % [58]. Regen, Wolken oder Schnee wurden hierbei nicht berücksichtigt. Gemäß [73] hatte starker Regen keinen großen Einfluss auf die Verbindung zum Satelliten. Unklar ist, wie sich starker Schneefall oder Schnee auf der Teilnehmer-Antenne auswirkt.

- Verbindung Gateway – Satellit. Die Verfügbarkeit der Verbindung Gateway – Satellit erfolgt im Ka-Band (Phase 1) und später zusätzlich im V- (Phase 2) sowie im E-Band (Phase 3). Je höher die Frequenz, desto größer ist im Allgemeinen die Dämpfung durch die Atmosphäre bzw. das Wetter. Im Ka-Band (und noch mehr im V- bzw. E-Band) kann es durch die atmosphärische Dämpfung zu einer Degradation der Datenraten bis hin zu vollständigen Ausfällen der Verbindung kommen [58]. Die in Tabelle 3 angegebenen Werte für die Dämpfung durch die Atmosphäre gelten für eine Verfügbarkeit von 99,5 % [58]. Aber selbst wenn es in einigen Teilen der Welt zu vollständigen Ausfällen der Verbindung Gateway – Satellit kommen sollte, wird es immer noch genügend Verbindungen geben, die den Verkehr übernehmen können. Dabei kann es natürlich zu einer Degradation der Datenraten aufgrund von Überlastsituationen kommen.
- Verbindung Satellit – Satellit: Aufgrund der Möglichkeit, max. 4 Laserverbindungen zu anderen Satelliten herstellen zu können, ist von einer sehr hohen Verfügbarkeit auszugehen.
- Verbindung Gateway – Internet-Koppelpunkt: Durch entsprechend redundante Glasfaseranbindungen ist von einer sehr hohen Verfügbarkeit auszugehen.

Mobile Nutzung

Starlink möchte Satelliteninternet auch für den mobilen Einsatz bereitstellen. Der Betreiber hat bei der US-Regulierungsbehörde FCC eine Genehmigung für die Ausstattung großer Fahrzeuge mit Breitband-Internet-Empfangsstationen beantragt. Aus dem Antrag geht hervor, das sogenannte „Earth Stations in Motion“ (ESIMs) für Automobile, Schiffe und Flugzeuge angeboten werden sollen. PKWs kommen dafür allerdings nicht in Frage, weil die Stationen zu groß seien, meldete SpaceX-Chef Elon Musk per Twitter. Er beabsichtigt also ausdrücklich nicht, alle Teslas an Starlink anzubinden [74].

„ESIMs ähneln im Großen und Ganzen den für den Hausgebrauch entwickelten Starlink-Satellitenschüsseln. Die ESIMs werden im 14,0-14,5-GHz-Band senden und im 10,7-12,7-GHz-Band empfangen, und sie werden die Regeln der gemeinsamen Nutzung des Spektrums einhalten, um Interferenzen mit anderen Frequenznutzern zu vermeiden, so SpaceX.“ [74]

Eine mobile Nutzung im Sinne von Mobilfunk mit tragbaren Endgeräten oder gar Smartphones ist hingegen nicht möglich. Smartphones haben in der Regel einen Antennengewinn von 0 dBi, so dass gemäß Gl. (1) und (2) mit den Parametern aus Tabelle 2 keine Datenübertragung möglich ist¹¹. Eine Schlüsseltechnologie im Starlink-Netz stellt die Teilnehmer-Antenne dar. Es ist derzeit unklar ob und wann es möglich sein wird, eine entsprechende Antenne zu entwickeln, die sich in tragbare Endgeräte integrieren ließe.

Sicherheit

Zum Thema Sicherheit liegen derzeit keine Informationen vor. Es kann an dieser Stelle nur darauf hingewiesen werden, dass Funkverbindungen deutlich leichter abzuhören sind als beispielsweise optische Verbindungen. Funkverbindungen sind viel leichter zugänglich und es müssen auch nicht erst – wie bei der Glasfaser – Signale aus einem Wellenleiter ausgekoppelt werden. 2015 ist es z.B. dem Chaos Computer Club in Deutschland gelungen,

¹¹ Mit den angegebenen Werten ergibt sich ein SNR von -12,6 dB.

Datenverbindungen des Satellitennetzes Iridium abzufangen [77]. Für sichere Verbindungen sollten daher entsprechend leistungsfähige und aktuelle Verschlüsselungstechnologien verwendet werden.

Vergleich Starlink-Satelliten-Netz mit FTTH-Glasfaseranschlüssen

In diesem Abschnitt soll die Leistungsfähigkeit des Starlink-Netzes mit Glasfasernetzen (FTTH) verglichen werden:

- Kapazität:

- *Starlink*

Mit sehr optimistischen Annahmen kann mit dem Starlink-Netz nach Abschluss der Phase 3 (fast 42.000 Satelliten) weltweit eine Kapazität von 2.344.298 Gbit/s und in Deutschland eine Kapazität von 6.684 Gbit/s im Downlink bereitgestellt werden. Bei einer Überbuchung von 1:20 (Planbitrate bzw. minimale Bitrate 5 Mbit/s) lassen sich damit in Deutschland max. rund 1,3 Mio. Teilnehmer mit einer Anschlussbitrate von 100 Mbit/s versorgen, was für eine flächendeckende Versorgung viel zu gering ist. Für Anschlussbitraten von 1 Gbit/s bzw. 10 Gbit/s reduzieren sich die Teilnehmerzahlen um den Faktor 10 bzw. 100.

Geht man umgekehrt von einer Vollversorgung aller rund 40 Mio. Haushalte aus, so erhält man eine Planbitrate von 167 kbit/s pro Teilnehmer, was selbst für einen 100 Mbit/s Anschluss viel zu wenig ist.

Die Upstream-Bitraten entsprechen etwa 30 % (Limitierung durch Gateways) bis 40 % (Limitierung durch Satellit) der Downstream-Bitraten.

- *Glasfasernetze (FTTH)*

Unterstellt man eine Vollversorgung der rund 40 Mio. Haushalte mit FTTH-GPON (Splitverhältnis 1:32), so würde dieses Netz eine Gesamtkapazität von etwa 40 Mio. / 32 x 2,25 Gbit/s = 2.812.500 Gbit/s im Downstream zur Verfügung stellen¹². *Vergleicht man dies mit dem Starlink-Netz so wird deutlich, dass ein deutschlandweites FTTH-Netz bereits mehr Kapazität bereitstellen würde als das gesamte Starlink-Netz nach Abschluss der Phase 3.* Weiterhin beträgt die Kapazität des Starlink-Netzes in Deutschland nur etwa 0,24 % eines FTTH-GPON-Netzes. Die Planbitrate in einem GPON-Netz mit einem Splitverhältnis 1:32 beträgt 70,3 Mbit/s pro Teilnehmer.

Die Kapazitäten eines FTTH-GPON-Netzes können durch Verwendung von XGS-PON um den Faktor vier auf 11.250.000 Gbit/s sowie durch die Verwendung von 1 Gbit/s bzw. 10 Gbit/s Punkt-zu-Punkt-Systemen 40.000.000 Gbit/s bzw. 400.000.000 Gbit/s symmetrisch erhöht werden.

Die Upstream-Bitraten entsprechen bei GPON und XGS-PON 50 % und bei FTTH Punkt-zu-Punkt-Systemen 100 % der Downstream-Bitraten.

- Latenz

Wenn die Entfernung größer als etwa 1.080 km ist, sind die Latenzen bzw. das Round Trip Delay mit dem Starlink-Netz aufgrund der größeren Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Funksignalen in Luft bzw. Vakuum geringer als über Glasfaserverbindungen. Befinden sich Teilnehmer und Zielservers innerhalb von Deutschland, so sind die Latenzen über Glasfaserverbindungen geringer. Für Verbindungen innerhalb von Europa mit Entfernungen von mehr als 1.080 km oder gar Interkontinentalverbindungen können mit dem Starlink-Netz Latenzen realisiert werden, die z. T. deutlich geringer als die über

¹² Hierbei wurde für GPON ein Overhead von 10 % angenommen, so dass die Nettokapazität 2,25 Gbit/s im Downstream und 1,125 Gbit/s im Upstream beträgt.

Glasfaserverbindungen sind, wobei der Unterschied mit zunehmender Entfernung größer wird. Für die meisten Anwendungen (VoIP, VoD, Videotelefonie, Surfen im Internet) spielt dies sicher keine Rolle. Es gibt aber auch Anwendungen (z.B. Finanzindustrie, Militär, low latency 5G Anwendungen), für die die z.T. deutlich geringeren Latenzen des Starlink-Netzes von großer Bedeutung sind und für die entsprechende Kunden auch bereit sind, dafür zu bezahlen [42].

- Verfügbarkeit

- *Starlink*

Angaben über die Verfügbarkeit des Starlink-Netzes gibt es zur Zeit nicht. Auch liegen keine Erfahrungswerte vor, da das Netz gerade erst im Aufbau ist. Wenn man von einem Totalausfall des gesamten Satellitennetzes aufgrund einer Kettenreaktion (ausgelöst durch eine Kollision von Satelliten mit Weltraummüll) einmal absieht, so weist das Starlink-Netz für den Abschnitt Satellit bis zum Internet-Koppelpunkt aufgrund seiner hohen Flexibilität, der enormen Zahl an Netzknoten (Satelliten) und seines hohen Vermaschungsgrades eine sehr hohe Verfügbarkeit auf. Eine Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Totalausfall des Satelliten-Netzes aufgrund einer Kettenreaktion kann derzeit nicht angegeben werden. Als Single-Point-of-Failure und damit bestimmend für die Gesamtverfügbarkeit des Services, verbleiben dann die Verbindung Satellit – Teilnehmer (geschätzt ca. 98 – 99 %) sowie die Verfügbarkeit des CPEs (keine Angabe).

- *Glasfasernetze (FTTH)*

Im Backbone- und Aggregationsnetz kann aufgrund von redundanten Anbindungen von einer sehr hohen Verfügbarkeit ausgegangen werden. Die FTTH-Netzknoten können durch eine redundante Auslegung der zentralen Baugruppen ebenfalls hochverfügbar gemacht werden. Allerdings kann beispielsweise durch einen Brand oder einen Stromausfall, der länger als die max. Überbrückungszeit der USV dauert, der komplette FTTH-Knoten ausfallen. Von einem derartigen Ausfall wären dann einige Tausend Kunden betroffen [78]. Weiterhin kann es zu einer Unterbrechung der Glasfaserverbindung zwischen FTTH-Knoten und CPE sowie zu einem Ausfall des CPEs (ONT) kommen. Bei einem Ausfall des CPEs ist jeweils nur ein Kunde betroffen, bei einer Unterbrechung der Glasfaserverbindung zwischen FTTH-Knoten und CPE hingegen können je nach Netztopologie ein bis mehrere Tausend Kunden betroffen sein. In den AGB werden für Glasfaseranschlüsse typischerweise Verfügbarkeiten von 98,5 % angegeben, die tatsächliche (technische) Verfügbarkeit ist in der Regel aber deutlich höher.

- Sicherheit

Bzgl. Sicherheit des Starlink-Netzes liegen derzeit keine Informationen vor. Allerdings sind Funkverbindungen grundsätzlich leichter abzuhören als optische Verbindungen. Funkverbindungen sind leichter zugänglich und es müssen auch nicht erst – wie bei der Glasfaser – Signale aus einem Wellenleiter ausgekoppelt werden. Zum Abfangen von Starlink-Signalen muss lediglich eine Antenne im selben Spot Beam wie die abzuhörende Verbindung platziert werden. Glasfaser befinden sich in der Regel – zumindest in Deutschland – innerhalb von Gebäuden bzw. unter der Erde. Für sichere Verbindungen über das Starlink-Netz sollten daher entsprechend leistungsfähige und aktuelle Verschlüsselungstechnologien verwendet werden. Da diese natürlich auch über Glasfasernetze realisiert werden können, *ergibt sich in Bezug auf Sicherheit ein Vorteil für Glasfaser-FTTH-Netze gegenüber dem Starlink-Netz.*

Fazit

Es ist derzeit noch nicht absehbar, ob und wann es Starlink gelingen wird, das geplante Satelliten-Netz inkl. der Phase 3, d.h. mit fast 42.000 Satelliten, tatsächlich auch zu realisieren [76]. Dies wird u.a. von der Verfügbarkeit

bzw. Genehmigung der entsprechenden Umlaufbahnen und Frequenzen für die Daten- und Telemetrierverbindungen abhängen, wobei künftig vermutlich viele LEO-Satellitenetze um diese Ressourcen konkurrieren werden [44,57]. Genehmigt sind bisher die Phasen 1 und 2. *Aber selbst im Endausbau stellt das Starlink-Netz aus folgenden Gründen keine Konkurrenz für Glasfaser FTTH Netze in Deutschland dar:*

- Die bereitgestellte Gesamtkapazität ist viel zu gering, um nennenswerte Marktanteile mit entsprechenden Bitraten erschließen zu können. Das Problem liegt an der begrenzten Bandbreite für Funkverbindungen (im vorliegenden Fall 7 bis 8x250 MHz für den Downlink und 7 bis 8x62,5 MHz für den Uplink). Im Vergleich dazu stellt die Glasfaser mit einigen 10 THz eine deutlich höhere Bandbreite zur Verfügung.
Selbst mit optimistischen Annahmen und nach Abschluss der Phase 3 stellt das Starlink-Netz nur 0,24 % der Downstream-Kapazitäten eines deutschlandweiten FTTH-GPON-Netzes dar, und es lassen sich damit max. 1,3 Mio. 100-Mbit/s- oder 0,13 Mio. 1 Gbit/s-Anschlüsse realisieren. Dagegen kann mit Glasfaser-FTTH-Netzen eine Vollversorgung mit Anschlussbitraten von 1 Gbit/s, 10 Gbit/s und künftig sogar noch höhere Datenraten (100 Gbit/s, 400 Gbit/s) problemlos realisiert werden.
- Die Upstream-Datenraten des Starlink-Netzes entsprechen maximal 30 % (Limitierung durch Gateways) bis 40 % (Limitierung durch Satellit) der Downstream-Datenraten, wohingegen die Upstream-Datenraten bei GPON und XGS-PON 50 % und bei FTTH-Punkt-zu-Punkt-Systemen 100 % der Downstream-Datenraten entsprechen.
- Die Latenzen von Glasfasernetzen sind zumindest für Verbindungen innerhalb von Deutschland geringer als die des Starlink-Netzes. Für die meisten Anwendungen (VoIP, VoD, Videotelefonie, Surfen im Internet) sind die geringeren Latenzen des Starlink-Netzes für Entfernungen von mehr als 1.080 km (Intra- und Interkontinentalverbindungen) nicht relevant.
- Das Starlink-Netz erfordert einen hohen Installationsaufwand beim Teilnehmer. Die Antenne sollte an einem möglichst hohen Punkt mit freiem Sichtfeld auf die Satelliten montiert werden, was in der Regel das Hausdach sein dürfte. Die Antenne muss dann über ein Netzkabel mit dem Netzteil verbunden werden, so dass hier eine entsprechende Hausverkabelung erforderlich ist. Dies dürfte eines der Haupthindernisse für die Kundenakzeptanz von Starlink-Internetanschlüssen sein, insbesondere wenn Alternativen vorhanden sind. In Mehrfamilienhäusern ist darüber hinaus die Genehmigung der Eigentümergemeinschaft erforderlich. Wird diese nicht erteilt, so darf gar keine Antenne auf dem Hausdach montiert werden. In Deutschland wohnen etwa 70 % aller Teilnehmer in Mehrfamilienhäusern. Unklar ist derzeit, ob und wenn ja, wie die Teilnehmer-Antenne bei starkem Schneefall von Schnee befreit werden muss.
Demgegenüber muss bei einem FTTH-Anschluss lediglich das CPE mit der TAE-Dose sowie dem Stromnetz verbunden werden.
- Die monatlichen Kosten für einen Starlink-Internetanschluss mit Downstream-Bitraten im Bereich von 50 bis 150 Mbit/s belaufen sich derzeit auf 99 € zzgl. 499 € für das CPE, eine Anschlussgebühr von 59 € sowie 50 € für den Versand und die weitere Abwicklung [17]. Zum Vergleich: Ein 100/50 Mbit/s-Anschluss der Deutschen Telekom (MagentaZuhause L) kostet monatlich 44,95 € und ein 300/150 Mbit/s-Anschluss der Deutschen Glasfaser 44,99 €.
- Die Leistungsaufnahme des Starlink-CPEs ist mit 110 bis 150 W deutlich höher als die für Glasfaser-FTTH-CPEs.
- Das Starlink-Netz weist eine geringere Sicherheit als Glasfaser-FTTH-Netze auf.

Auch gegenüber bestehenden Mobilfunktechnologien (GSM, LTE, 5G) ist das Starlink-Netz nicht konkurrenzfähig. Dies gilt schon aufgrund der Tatsache, dass tragbare Endgeräte nicht verfügbar sind und nicht absehbar ist, wann und ob diese überhaupt jemals verfügbar sein werden und zum anderen aufgrund der sehr begrenzten Kapazitäten selbst im Endausbau.

Trotz der Nachteile gegenüber Glasfasernetzen handelt es sich beim Starlink-Netz aber um ein technologisch sehr interessantes Netz, das u.a. für die folgenden Anwendungsszenarien ideal geeignet erscheint:

- Weltweite und flächendeckende Versorgung von Gegenden mit geringer Bevölkerungsdichte (z.B. ländliche Gebiete, Weltmeere, Arktis, Antarktis, Wüsten, Steppen, Weideflächen, Gebirge, falls eine Sichtverbindung möglich ist auch Wälder). *Daher kann das Starlink-Netz eher als Ergänzung denn als Konkurrenz zu bestehenden Breitbandtechnologien gesehen werden, mit dem Teilnehmer eine Breitband-Grundversorgung und digitale Teilhabe erhalten können, die über bestehende Technologien weder wirtschaftlich noch mit Unterstützung von Fördermaßnahmen sinnvoll erschlossen werden können.* Eine große Konkurrenz dürfte das Starlink-Netz aber aufgrund der besseren Performance in den Punkten Kapazitäten, Latenz und Verfügbarkeit - bei gleichem Installationsaufwand beim Kunden - für GEO-Satelliteninternet werden.
- Low-Latency-Anwendungen (z.B. Finanzindustrie, Militär, Online Gaming) über weite Entfernungen (> 1080 km), d.h. Intra- und Interkontinentalverbindungen.
- 5G-Backhaul- und Backbone für low-latency-Anwendungen mit moderaten Bitraten und/oder einer begrenzten Anzahl an Verbindungen. Non-Terrestrial Networks wie beispielsweise Satellitenetze werden ab der 3GPP Rel. 17 Bestandteil der 5G-Spezifikation sein [15].
- Backup für hochverfügbare, bestehende Breitbandverbindungen (z.B. für Geschäftskunden).
- Internetverbindungen zu mobilen Endstationen (Earth Stations in Motion) wie Automobile, Schiffe, Flugzeuge [39], Baustellenfahrzeuge, landwirtschaftliche Fahrzeuge u. Ä.. Explizit ausgenommen sind PKW, weil hierfür die Empfangsstationen zu groß sind.
- Militärische Anwendungen (z.B. globale Vernetzung von Drohnen oder Panzern) [76,77]
- Anwendungen in der verarbeitenden Industrie [33]
- Ggf. auch bestimmte IoT-Anwendungen bzw. IoT-Backhaul. Bei vielen IoT-Anwendungen stehen jedoch kompakte und preisgünstige Endgeräte mit einem sehr geringen Stromverbrauch im Vordergrund. Zudem wird in einigen Fällen auch keine Sichtverbindung zu Starlink-Satelliten möglich sein. Für solche Anwendungen ist das Starlink-Netz nicht geeignet.

Die Stärke des Starlink-Netzes liegt weniger in der bereitgestellten Kapazität als vielmehr in der globalen Vernetzung sehr vieler Endgeräte mit moderaten Datenraten aber geringen Latenzen bei hinreichend großen Entfernungen. Die wirtschaftliche, politische und auch militärische Bedeutung derartiger Satelliten-Kommunikationsnetze sollte daher nicht unterschätzt werden.

Referenzen

- [1] <https://www.fr.de/wissen/starlink-internet-spacex-elon-musk-deutschland-beta-phase-test-bestellung-kaufen-90237615.html>.
- [2] <https://www.spiegel.de/netzwelt/web/elon-musk-hofft-auf-500-000-starlink-kunden-bis-mitte-2022-a-58d34d7a-a93c-4bf8-9e60-585339e5db04>.
- [3] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/054-scheuer-zuschussprogramm-satelliten-richtfunk.html>
- [4] BMVI Breitbandatlas (Stand Ende 2020), S. 9.
- [5] Bundesnetzagentur Jahresbericht 2020
- [6] Puhl, P. et al. Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH (WIK) (2019). Diskussionsbeitrag „Breitbandzugang über Satellit in Deutschland – Stand der Marktentwicklung und Entwicklungsperspektiven“, Nr. 444
- [7] <https://www.mdr.de/wissen/satelliten-starlink-oneweb-weltraumschrott-schaedigung-atmosphaere-100.html>
- [8] Gigabit Büro des Bundes, Internet via Satellit Technologie, Leistungsfähigkeit und Anwendungsbereiche, September 2020.
- [9] <https://www.fr.de/wissen/starlink-satelliten-spacex-megakonstellation-erdatmosferaere-ozonschicht-beschaedigen-geoengineering-90793506.html>.
- [10] Daniel Voelsen, „Internet aus dem Weltraum“, SWP-Studie 2, Februar 2021, Berlin
- [11] <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx>
- [12] <https://www.heise.de/news/Keine-Internetanbindung-ueber-Ballons-Google-Mutter-Alphabet-schliesst-Loon-5032615.html>
- [13] <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Aquila-Facebook-stampft-Internet-Drohnen-ein-4092855.html?view=print>
- [14] <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/mobilfunk-aus-der-stratosphaere-609934>
- [15] https://www.3gpp.org/news-events/2145-rel-17_newtimeline
- [16] Satellit eis 5G, SATis5 White Paper, esa, November 2020
- [17] <https://www.heise.de/news/Starlink-Schon-mehr-als-10-000-Nutzer-nicht-nur-in-den-USA-5047047.html>
- [18] Swinford, R.; Grau, B. (2015): High Throughput Satellites: Delivering future capacity needs, abgerufen am 21. Februar 2019 unter https://www.avantiplc.com/wp-content/uploads/2018/08/ADL_High_Throughput_Satellites-Main_Report.pdf
- [19] <https://www.teltarif.de/konnect-starlink-schnelles-internet-aus-dem-all-satellit/news/83834.html>
- [20] <https://www.teltarif.de/breitband-satellit-starlink-musk-konnect-eutelsat/news/83575.html>
- [21] <https://www.lightreading.com/4g3gwifi/starlinks-network-faces-significant-limitations-analysts-find/d/d-id/764159>
- [22] https://ecfsapi.fcc.gov/file/10208168836021/FBA_LEO_RDOF_Assessment_Final_Report_20210208.pdf

- [23] http://www.broadbandworldnews.com/document.asp?doc_id=768529&f_src=ubb2020_sitedefault
- [24] <https://www.lightreading.com/services/musks-starlink-is-not-some-huge-threat-to-telcos/d/d-id/758092>
- [25] <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>
- [26] <https://www.heise.de/-5038163>
- [27] <https://www.starlink.com>
- [28] https://www.lightreading.com/opticalip/starlink-surpasses-10000-users-/d/d-id/767195?itc=lrnewsletter_lrldaily&utm_source=lrnewsletter_lrldaily&utm_medium=email&utm_campaign=02052021
- [29] http://www.broadbandworldnews.com/author.asp?section_id=733&doc_id=768598&f_src=ubb2020_sitedefault
- [30] https://www.reddit.com/r/Starlink/comments/i9w09n/list_of_confirmed_starlink_speed_tests/
- [31] https://www.xing-news.com/reader/news/articles/3804626?cce=em5e0cbb4d.%3AfRx-2hen17qdt95hq0ReAB&link_position=digest&newsletter_id=72099&toolbar=true&xng_share_origin=email
- [32] <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/starlink-der-start-von-elon-musks-satelliten-internet-in-deutschland-verzoegert-sich/26910580.html?ticket=ST-12956940-SWLHWddYl0iqidqwPhej-ap2>
- [33] <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/spacex-tochterunternehmen-starlink-elon-musks-satelliten-internet-startet-in-deutschland/26993108.html?ticket=ST-7999102-zq0Wb64LyEZiCOB92uJa-ap1>
- [34] <https://www.heise.de/news/SpaceX-baut-eigene-Fabrik-fuer-Satelliteninternet-Starlink-5070149.html>
- [35] <https://www.teltarif.de/starlink-stromverbrauch-ueber-100-watt/news/84154.html>
- [36] https://www.lightreading.com/services/elon-musk-says-starlink-speed-doubling-to-300-mbps/d/did/767652?itc=lrnewsletter_lrldaily&utm_source=lrnewsletter_lrldaily&utm_medium=email&utm_campaign=02242021
- [37] Starlink: Wer profitiert von SpaceX' Satelliten-Internet? - Spektrum der Wissenschaft
- [38] https://t3n.de/news/elon-musk-starlink-internet-geschwindigkeit-1357294/?xing_share=news
- [39] <https://www.spiegel.de/wissenschaft/medizin/boeing-737-max-wie-die-us-behoerde-faa-jede-maschine-im-auge-behaelt-a-65b01b6e-7679-462c-85e7-573117ff5bd3>
- [40] <https://news.microsoft.com/transform/azure-space-partners-bring-deep-expertise-to-new-venture/>
- [41] <https://www.geekwire.com/2020/project-kuiper-plus-aws-amazons-cloud-satellite-internet-ventures-mesh/>
- [42] <https://www.youtube.com/watch?v=giQ8xEWjnBs>
- [43] <https://satellitemap.space/#>
- [44] <https://www.heise.de/-5037362>
- [45] <https://www.sueddeutsche.de/wissen/satelliten-lichtverschmutzung-nachthimmel-helligkeit-teleskop-1.5251441>
- [46] <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>

- [47] <https://www.mdr.de/wissen/satelliten-starlink-oneweb-weltraumschrott-schaedigung-atmosphaere-100.html>
- [48] <https://www.br.de/wissen/starlink-spacex-satelliten-kette-himmel-100.html>
- [49] <https://www.teslarati.com/spacex-starlink-satellite-upgrade-more-bandwidth-more-beams/>
- [50] <https://fragdenstaat.de/anfrage/frequenzen-fur-starlink-und-andere-satelitengestutzte-internetanbieter/>
- [51] BNetzA, Amtsblatt 23, ISSN 1434-8128, Bonn, 23. Dezember 2020
- [52] read://https_arstechnica.com/?url=https%3A%2F%2Farstechnica.com%2Finformation-technology%2F2018%2F11%2Fspacex-gets-fcc-approval-for-7500-more-broadband-satellites%2F
- [53] FCC, APPLICATION FOR APPROVAL FOR ORBITAL DEPLOYMENT AND OPERATING AUTHORITY FOR THE SPACEX GEN2 NGSO SATELLITE SYSTEM, May 2020
- [54] <https://www.tesmanian.com/de/blogs/tesmanian-blog/spacex-starlink-internet-satellite-technical-details>
- [55] <https://kleo-connect.com/constellation>
- [56] <https://www.tesmanian.com/de/blogs/tesmanian-blog/spacex-starlink-internet-satellite-technical-details>
- [57] <https://www.heise.de/-5038163>
- [58] Inigo del Portillo et al., „A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband“, 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 October 2018.
- [59] Alp Sayin et al., „Passive radar using Starlink transmissions: A theoretical study“, EasyChair Preprint 900, 14. April 2019
- [60] BNetzA, Amtsblatt 23, ISSN 1434-8128, Bonn, 23. Dezember 2020
- [61] SpaceX's Starlink satellite internet: It's time for tough talk on cyber security in space | Science | In-depth reporting on science and technology | DW | 21.02.2018
- [62] <https://www.lightreading.com/4g3gwifi/starlinks-network-faces-significant-limitations-analysts-find/d/d-id/764159>
- [63] http://www.broadbandworldnews.com/document.asp?doc_id=768529&f_src=ubb2020_sitedefault
- [64] <https://www.youtube.com/watch?v=QEIUdMiCoIU>
- [65] <https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden>
- [66] SpaceX launches Starlink satellites as it deorbits original ones - SpaceNews
- [67] <https://www.youtube.com/watch?v=k4Tv1KJ0qes>
- [68] <https://www.youtube.com/watch?v=MmrWxNqfq4Y>
- [69] <https://www.heise.de/news/Immer-mehr-Satelliten-im-Orbit-ESA-nennt-Entwicklung-unhaltbar-6058051.html?view=print>
- [70] <https://www.heise.de/news/Warnung-vor-Satellitenkollision-Wahrscheinlichkeit-fuer-Crash-ueber-20-Prozent-6009704.html>
- [71] <https://www.heise.de/news/SpaceX-und-OneWeb-Beinahe-Kollision-mit-einem-Starlink-Satelliten-6011042.html>

- [72] <https://www.heise.de/news/Starlink-Satelliten-Schuessel-stellt-bei-Hitze-die-Arbeit-ein-6072218.html>
- [73] https://arstechnica.com/information-technology/2020/11/spacex-starlink-has-some-hiccups-as-expected-but-users-are-impressed/?itm_source=parsey-api
- [74] <https://www.heise.de/news/Starlink-bringt-Internet-ins-Wohnmobil-5075185.html>
- [75] K. Obermann, „Nachhaltigkeitsvergleich der Zugangsnetz-Technologien FTTC und FTTH“, 13.05.2020
- [76] <https://spacenews.com/air-force-laying-groundwork-for-future-military-use-of-commercial-megaconstellations/>
- [77] Starlink: Wer profitiert von SpaceX' Satelliten-Internet? - Spektrum der Wissenschaft

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	vierte Mobilfunkgeneration (Long Term Evolution [LTE])
5G	fünfte Mobilfunkgeneration
ARPU	Average Revenue per User
BNetzA	Bundesnetzagentur
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BWA	Broadband Wireless Access
CASC	China Aerospace Science and Technology Corporation
CASIC	China Aerospace Science and Industry Corporation
CPE	Customer Premises Equipment
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	Digital Subscriber Line
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
ESIM	Earth Stations in Motion
FCC	Federal Communications Commission
FSS	Fixed Satellite Services
FTTB	Fiber-to-the-Building
FTTH	Fiber-to-the-Home
GB	Gigabyte
GEO	Geosynchronous Earth Orbit
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GSM	Global System for Mobile Communications
HAP	High-altitude platform
HFC	Hybrid Fiber Coax
HTS	High Throughput Satellite
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protokoll
LEO	Low Earth Orbit
LNB	Low Noise Block
LTE	Long Term Evolution
MEO	Medium Earth Orbit

SNR	Signal-zu-Rauschverhältnis
TAE	Telekommunikations-Anschluss-Einheit
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VHTS	Very High Throughput Satellite
VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Privat Network
WLAN	Wireless Local Area Network
XGS-PON	10 Gbit/s PON