



Leistungsfähigkeit von Satelliteninternet gemäß dem Starlink- Konzept

**BREKO
Webkonferenz**

16.09.2021

Agenda

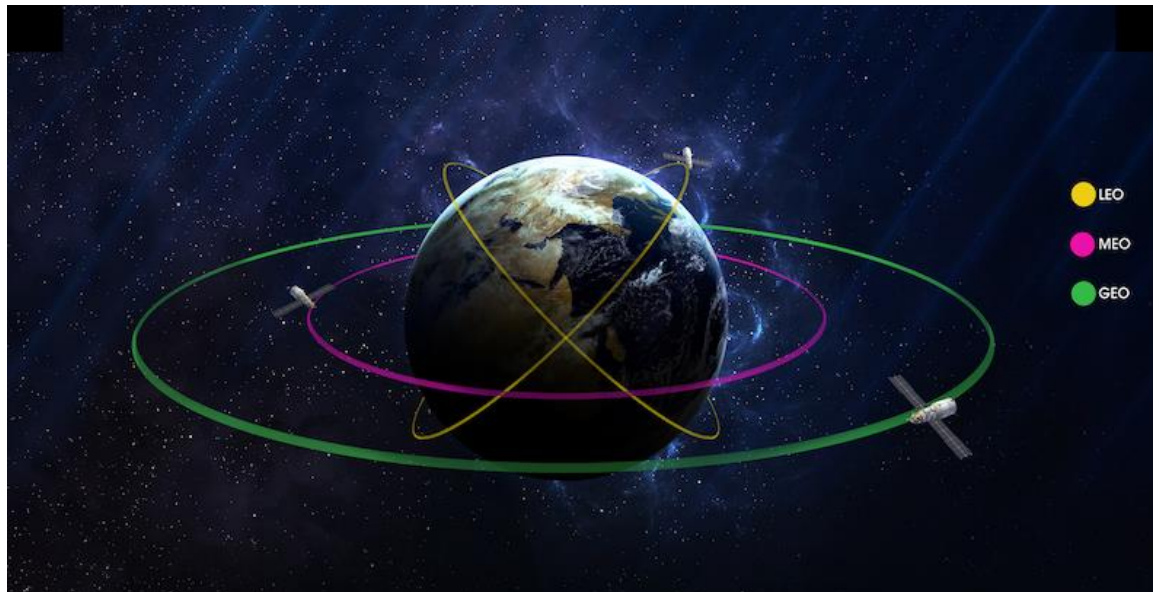
- Ziel der Untersuchung
- Übersicht: Breitband-Internetzugänge mit Satelliten
- Breitband-Internetzugänge mit GEO-Satelliten
- Breitband-Internetzugänge mit LEO-Satelliten
- Fazit

Ziel

- Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Breitband-Internetzugänge mit LEO-Satelliten
 - 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

Übersicht: Breitband- Internetzugänge via Satellit

- GEO-Satelliten: 35.786 km über der Erdoberfläche
- MEO-Satelliten: 2000 bis 35.786 km (z.B. Globalstar, O3b mPower, GPS, Galileo, GLONASS)
- LEO-Satelliten: 200 bis 2.000 km



[Quelle: Technology update with e3 systems – The Islander](#)

Übersicht: LEO-Satelliten-Internet Systeme

Die Pläne der wichtigsten Unternehmen

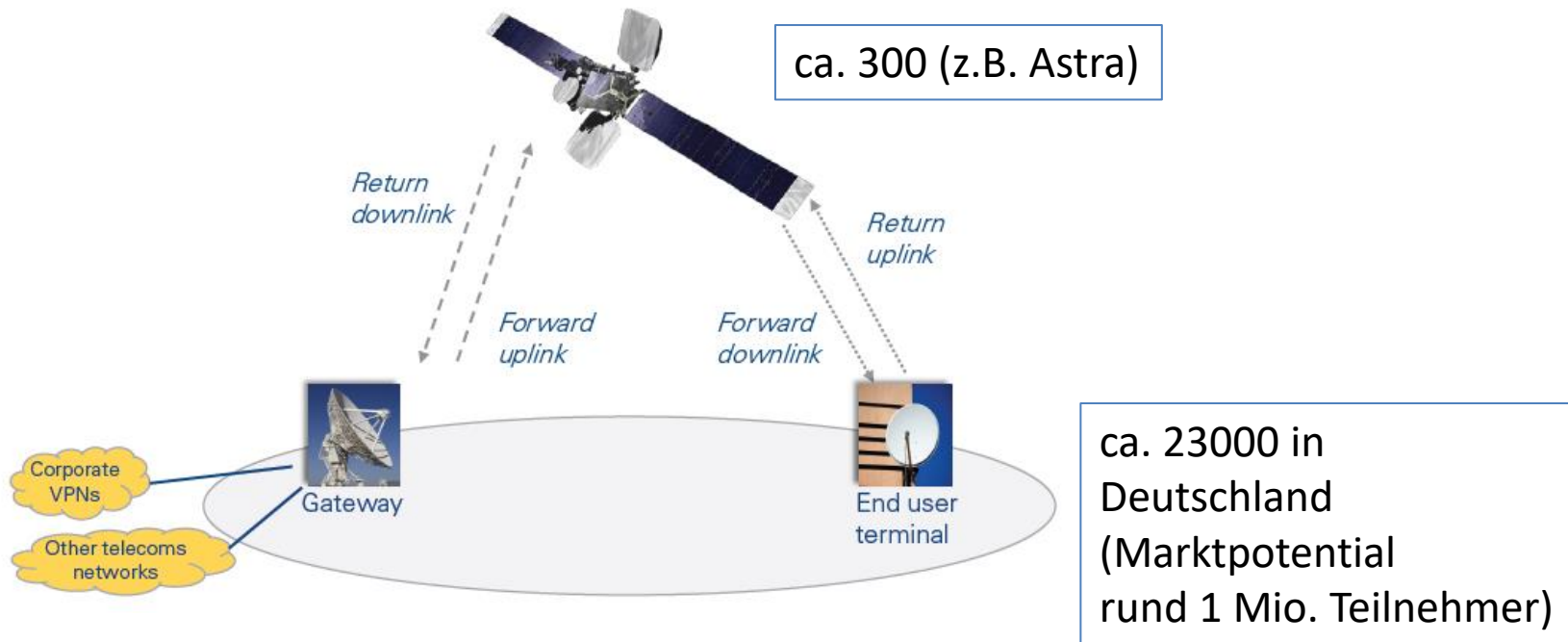


Stand: 20. Januar 2021

© 2021 Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP)

=> Alle Systeme müssen um Frequenzen und Umlaufbahnen konkurrieren!

GEO Satelliten



Beispiel: Kosten 50/6 Mbit/s Internetanschluss 59,80 € bis 64,80 €

GEO Satelliten



a) 23,5° Ost/Astra2Connect



b) 31,5° Ost/Avanti HYLAS 2B

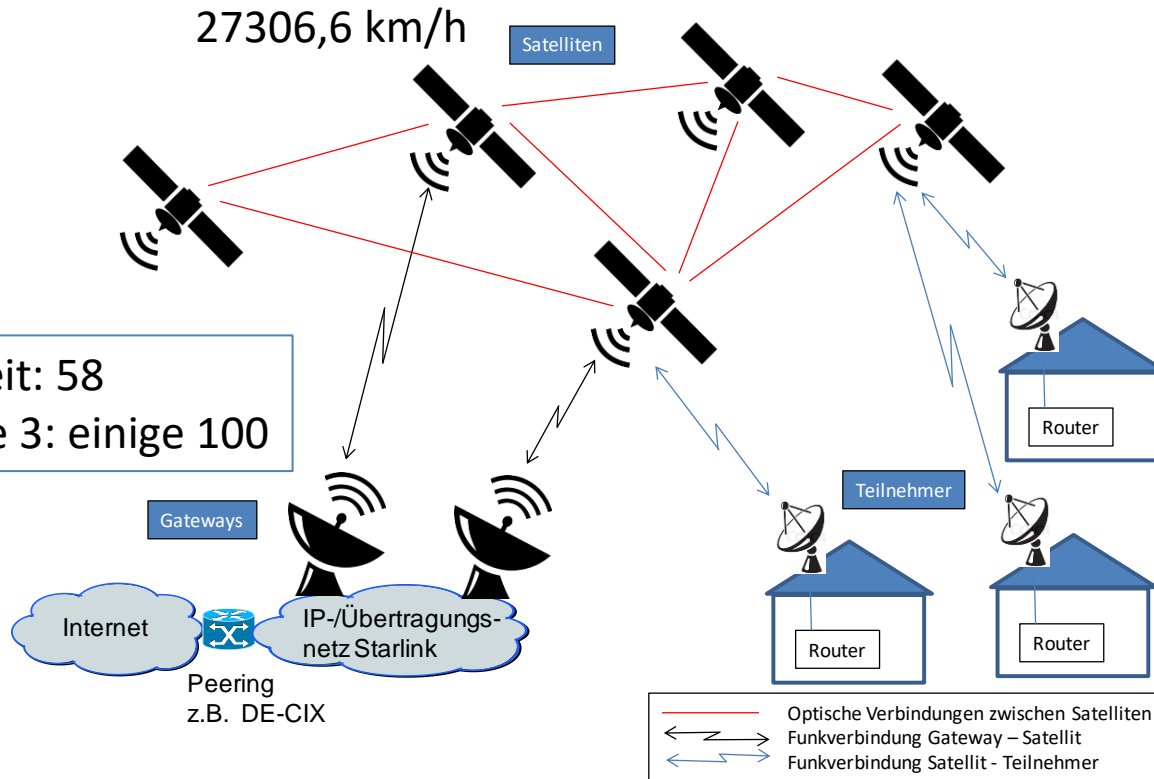
Probleme:

- begrenzte Kapazität, die sich alle Teilnehmer einer Ausleuchtzone teilen müssen
Beispiel: Gesamtkapazität Satellit 1000 Gbit/s, eine Mio. aktive Teilnehmer
=> 1 Mbit/s pro Teilnehmer
- hohe Latenz: 240 bis 250 ms (VPN, online gaming)
- Konkurrenz durch LEO Satelliten

LEO Satelliten

Phase 1:	4408
Phase 2:	7518
<u>Phase 3:</u>	<u>30000</u>
GESAMT	rund 42.000

Derzeit: 69.000 Beta-Tester in Deutschland
2022: 500.000 Teilnehmer

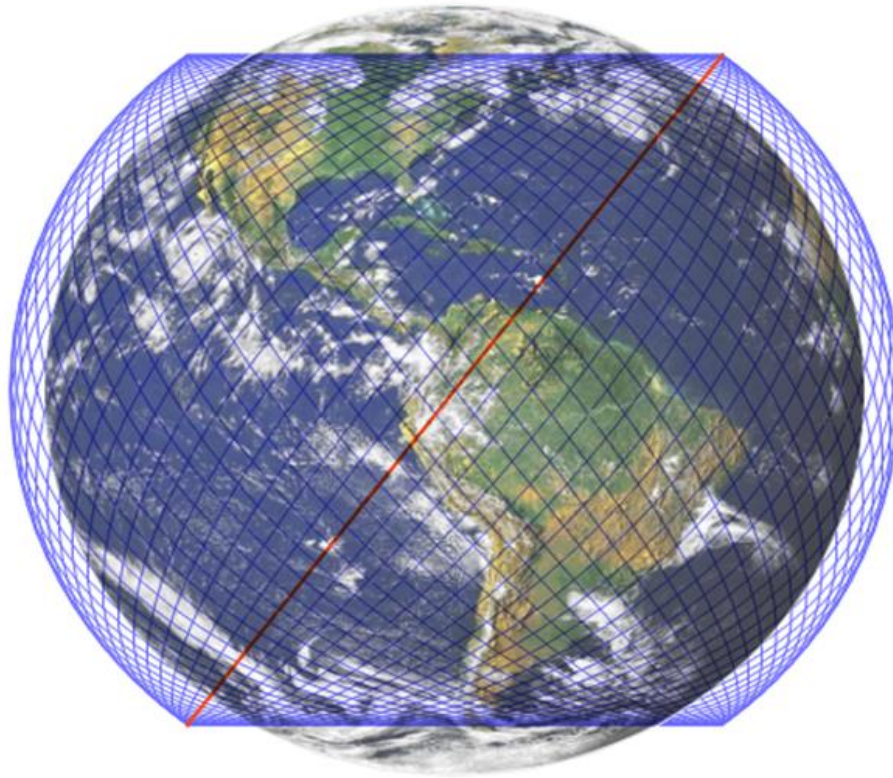


Derzeit: 58
Phase 3: einige 100

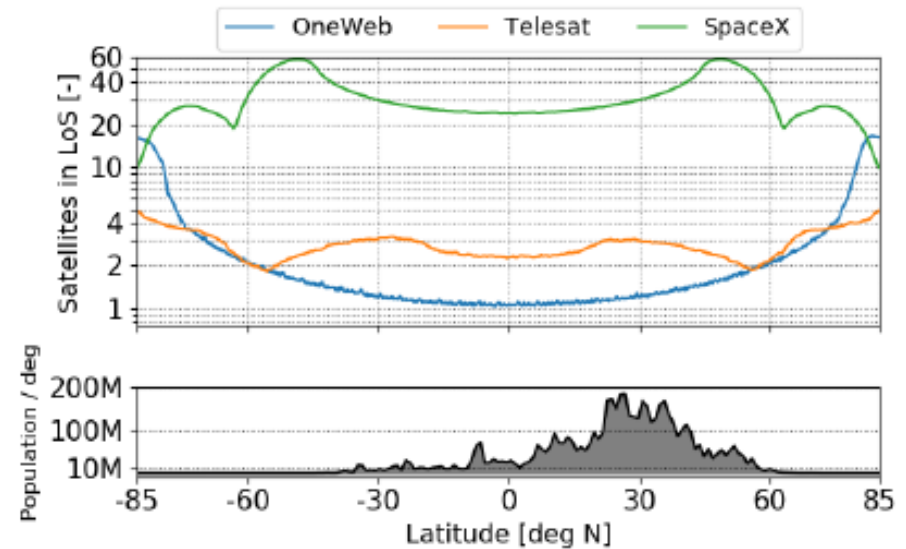
Kosten 50 bis 150 Mbit/s (später 300 Mbit/s bis 10 Gbit/s), Latenzen 20 bis 40 ms

- monatl. 99 € + 24 € Strom (110 bis 150 W)
- einmalig: 499 € für CPE, Anschlussgebühr+Versand 109 €

Umlaufbahnen Phase 1

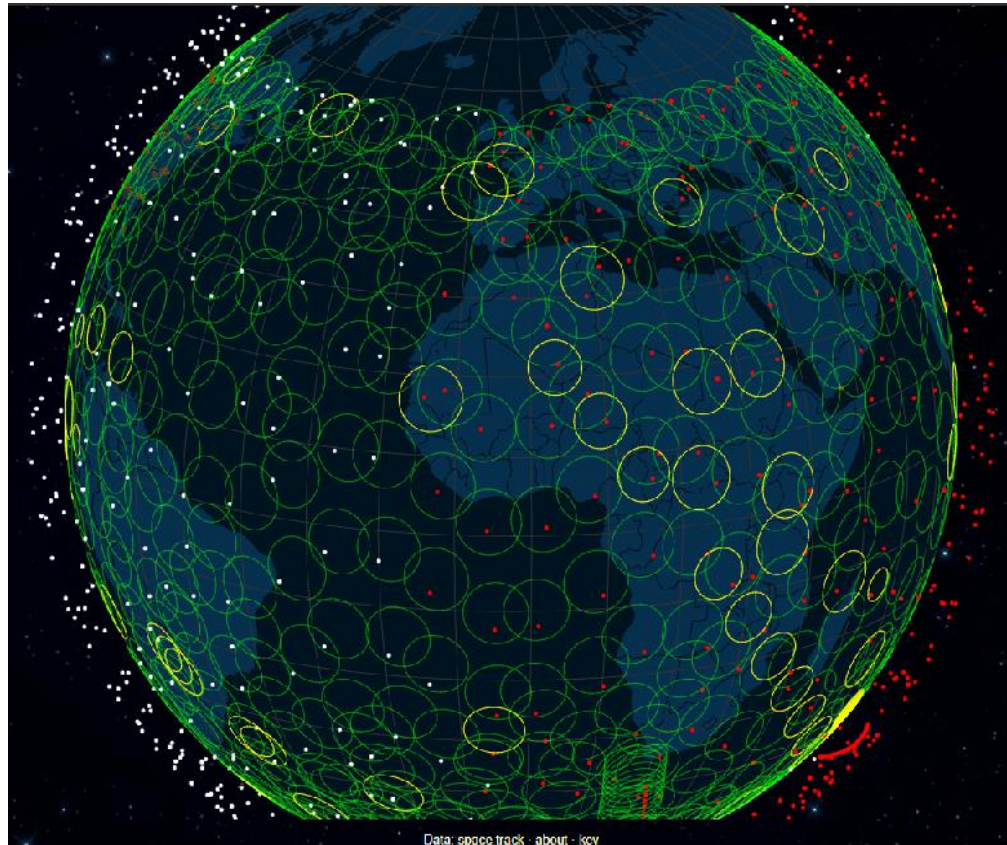


Quelle: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>



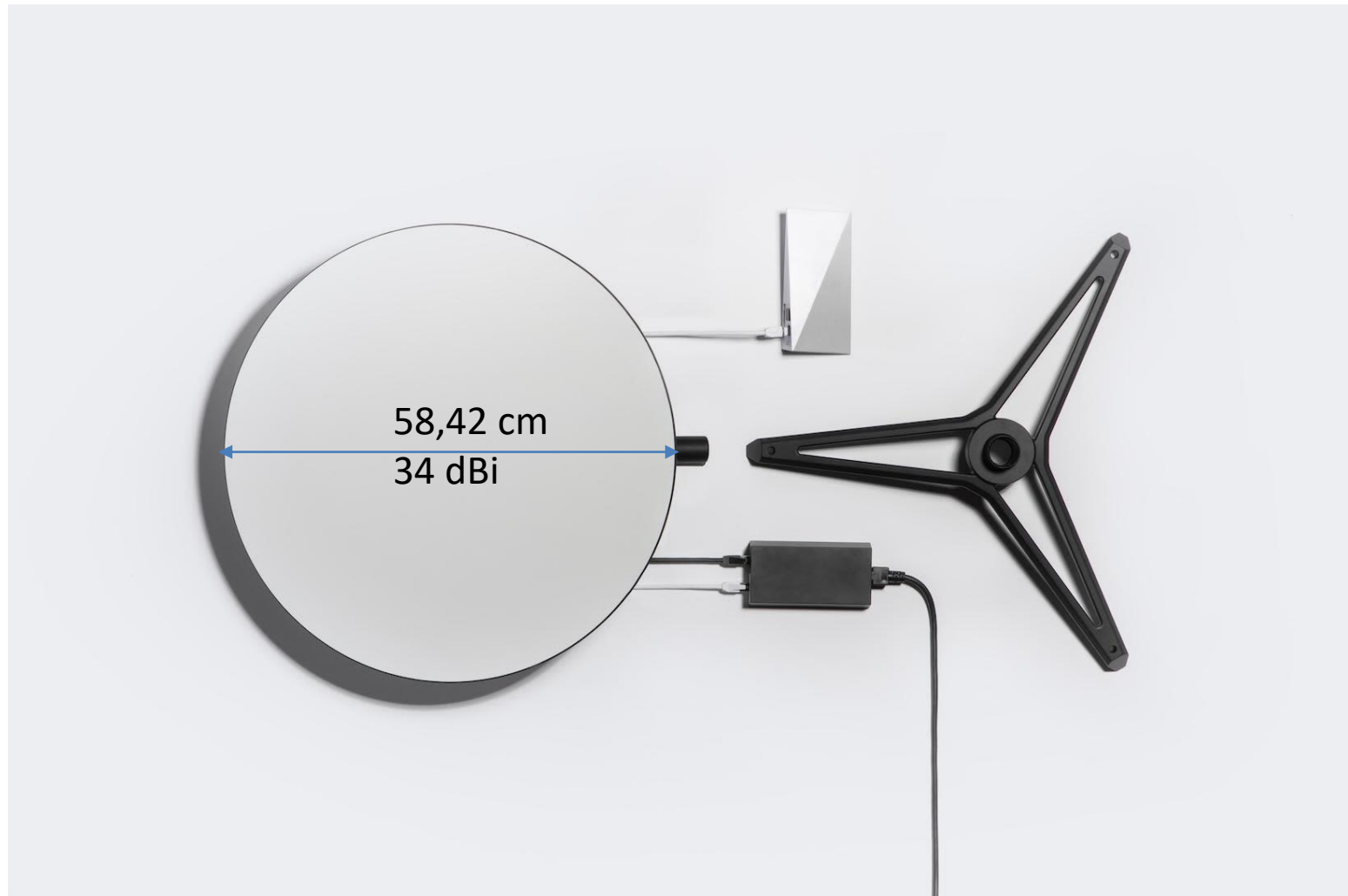
Quelle: Inigo del Portillo et al., „A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband“, 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1-5 October 2018.

Positionen und Versorgungsradien

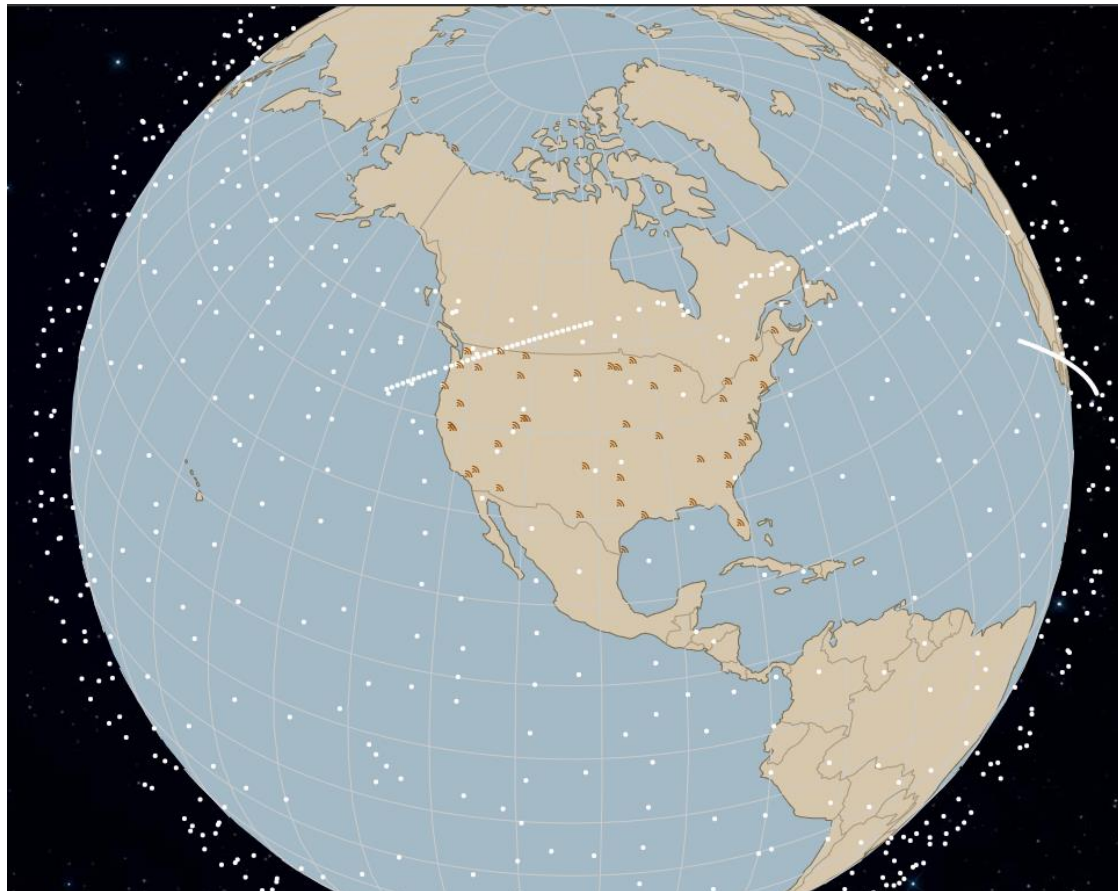


[Live Starlink Satellite Map](#)

Customer Premises Equipment

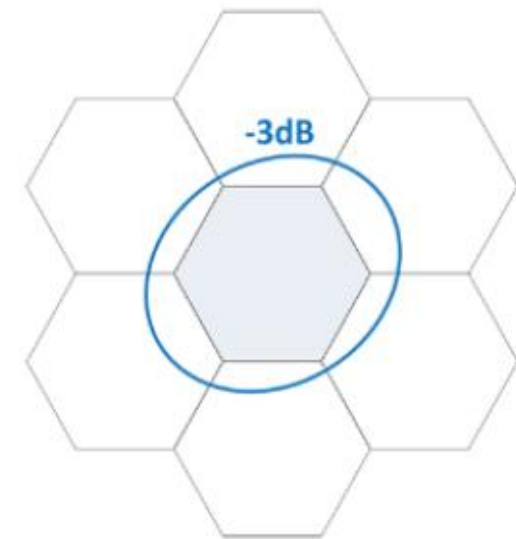
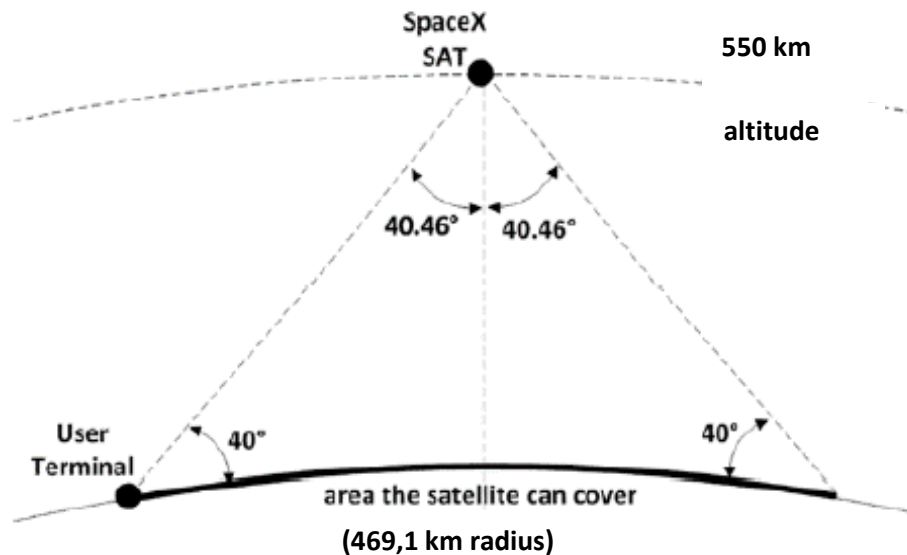


Gateways



Deutschland z.B. Erdfunkstelle Usingen

Versorgungsfläche Satellit



Fläche: 691.265,7 km²

⇒ 738 Satelliten für die gesamte Erde

⇒ 1 Satellit für Deutschland

Fläche gleichzeitige Versorgung:

7x452,5 km² = 3.167,3 km²

⇒ 0,43 % der max. Versorgungsfläche

⇒ Time Division Multiplexing

Kapazität Satellit

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

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

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]
$G_{iso,E}$	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

8 Spot Beams:

⇒ 14/5,5 Gbit/s (Literatur: 17-23 Gbit/s)

⇒ upstream Bitraten etwa 40 % der downstream Bitraten

Kapazität Gateway

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]
$G_{\text{iso},E}$	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

Uplink: 8x500 MHz; Downlink: 9x250 MHz
⇒ Gesamtkapazität Uplink 59 Gbit/s; Downlink 17,8 Gbit/s
⇒ upstream Bitraten etwa 30 % der downstream Bitraten

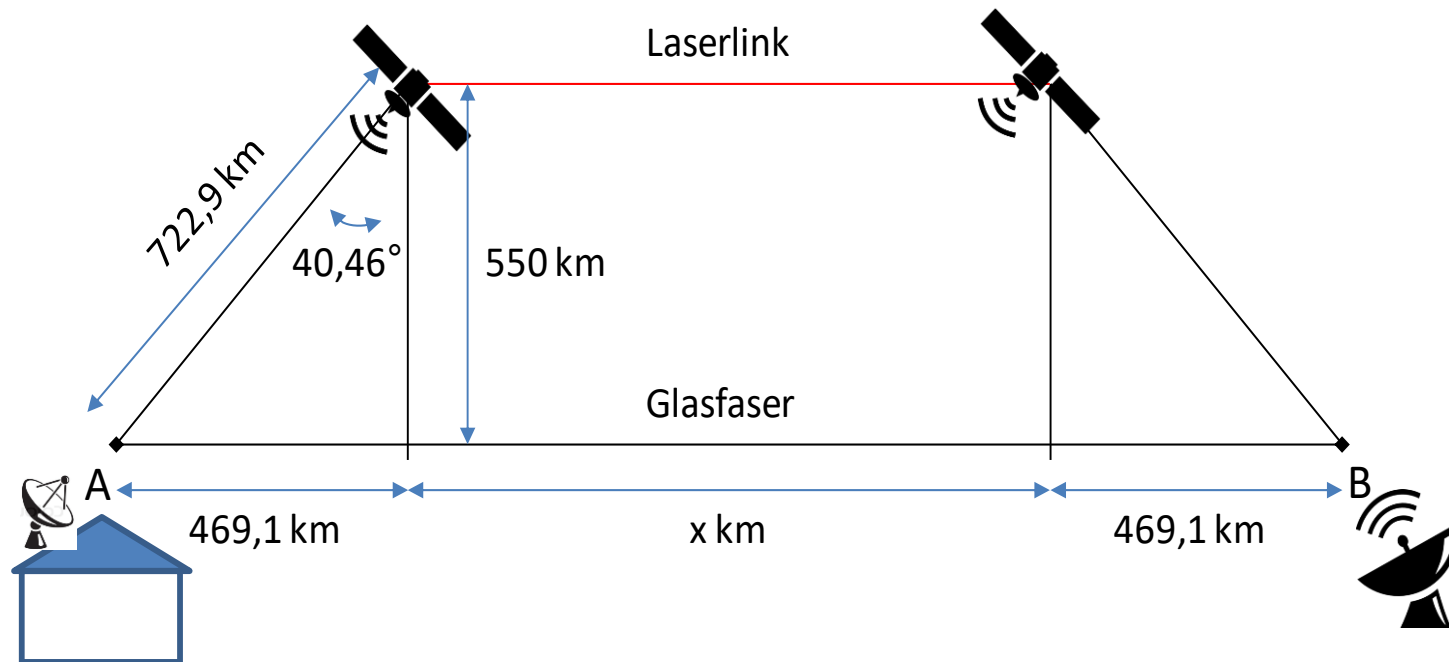
Kapazität Starlink Netz (konservative Annahmen)

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

Kapazität Starlink Netz (optimistische Annahmen)

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

Latenz Starlink Netz



=> für $x = 141,7$ km ergibt sich sowohl für die Satelliten- als auch für die Glasfaserverbindung eine Latenz von 5,3 ms (Round Trip Delay von 10,6 ms)
=> für Glasfaserstrecken mit einer Länge von mehr als etwa 1.080 km ist die Latenz für die Satellitenverbindung geringer

Round Trip Delay genauere Modelle

- Verbindung London –New York
 - 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
- Verbindung NNJ4 Rechenzentrum in New Jersey (USA) – Rechenzentrum LD4 in Slough (UK)
 - 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 – Johnnesburg
 - 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

[Starlink revisions, Nov 2018 - YouTube](#)

3:56 s

Verfügbarkeit (1)

- Satelliten
 - Ausfallrate 7 % pro Jahr
 - Satelliten können sich autonom bewegen, um Kollisionen mit Weltraummüll und anderen Raumfahrzeugen zu vermeiden, Kollisionen können aber nicht ausgeschlossen werden.
=> Kettenreaktion möglich, bei der zerstörte Satelliten weitere Satelliten zerstören und es schließlich zu einem Ausfall des gesamten Satellitennetzes kommt (Kessler-Syndrom). Eine Wahrscheinlichkeit hierfür kann nicht angegeben werden.
Es gibt zwar täglich mehrere Kollisionswarnungen, zu Ausweichmanövern kommt es aber nur etwa 2 bis 3 mal pro Jahr
 - LEO-Satelliten befinden sich unterhalb des Van Allen Belts, welcher die energiegeladenen Teilchen des Sonnenwinds hält
 - Hackerangriffe
 - Störung der Telemetrie- und/oder Datenkanäle der Satelliten durch entsprechende Störsender
 - 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: Die Teilnehmerantenne ist allerdings für einen Temperaturbereich von -30 bis +40° spezifiziert und arbeitet oberhalb von +40° nicht mehr

Verfügbarkeit (2)

- Gateway: An jedem Gateway-Standort befinden sich mehrere Antennen, so dass bei Ausfall einer oder mehrerer Antennen immer noch eine Verbindung zum Satelliten besteht. Allerdings kann es etwa durch Stromausfall oder Brand zu einem Komplettausfall des Gateways kommen.
- Verbindung Satellit – Teilnehmer
 - Gemäß Starlink kann es zu einer Degradation der Bitraten durch Schnee, starken Regen oder Wind kommen
 - Die hier angenommenen Werte für die Dämpfung durch die Atmosphäre gelten für eine Verfügbarkeit von 99 %. Regen, Wolken oder Schnee wurden hierbei nicht berücksichtigt.
 - In einer Studie wurde gefunden, dass starker Regen keinen großen Einfluss auf die Verbindung zum Satelliten hat. Unklar ist, wie sich starker Schneefall oder Schnee auf der Teilnehmer-Antenne auswirkt.
- Verbindung Gateway – Satellit
 - 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
 - Die hier angenommenen Werte für die Dämpfung durch die Atmosphäre gelten für eine Verfügbarkeit von 99,5 %
 - 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.

Verfügbarkeit (3)

- 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.
- Fazit
 - Angaben über die Verfügbarkeit des Starlink-Netzes gibt es zur Zeit nicht
 - Wenn man von einem Totalausfall des gesamten Satellitennetzes aufgrund einer Kettenreaktion einmal absieht, so weist das Starlink-Netz für den Abschnitt Satellit bis zum Internet-Koppelpunkt aufgrund seiner hohen Flexibilität, der enormen Zahl an Netzknuten (Satelliten) und seines hohen Vermaschungsgrades eine sehr hohe Verfügbarkeit auf.
 - 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).

Mobile Nutzung

- Earth Stations in Motion“ (ESIMs) für Automobile, Schiffe und Flugzeuge. PKWs kommen dafür nicht in Frage, weil die Stationen zu groß sind
- 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
- Eine mobile Nutzung im Sinne von Mobilfunk mit tragbaren Endgeräten oder gar Smartphones ist hingegen nicht möglich.

Sicherheit

- Keine Informationen
- Funkverbindungen deutlich leichter abhörbar als optische Verbindungen
- 2015 ist es z.B. dem Chaos Computer Club in Deutschland gelungen, Datenverbindungen des Satellitennetzes Iridium abzufangen

Fazit (1)

Selbst im Endausbau (42000 Satelliten) stellt das Starlink-Netz keine Konkurrenz für Glasfaser FTTH Netze in Deutschland dar:

- 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
=> max. 1,3 Mio. 100- Mbit/s- oder 0,13 Mio. 1 Gbit/s-Anschlüsse
=> FTTH-Netzen: Vollversorgung mit 1 Gbit/s, 10 Gbit/s oder mehr
- Starlink: upstream 30 % bis 40 % der Downstream Datenraten
[GPON: 50 %; FTTH Punkt-zu-Punkt 100 %]
- 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 nicht relevant.

Fazit (2)

- Starlink: hoher Installationsaufwand beim Teilnehmer
 - Die Antenne muss auf dem Hausdach montiert werden => Hausverkabelung erforderlich
 - In Mehrfamilienhäusern (in Deutschland 70 % der Teilnehmer) ist die Genehmigung der Eigentümergeinschaft erforderlich.
 - Unklar ist derzeit, ob und wenn ja, wie die Teilnehmer-Antenne bei starkem Schneefall von Schnee befreit werden muss
- 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

Fazit (3)

Starlink-Netz für die folgenden Anwendungsszenarien ideal geeignet:

- Weltweite und flächendeckende Versorgung von Gegenden mit geringer Bevölkerungsdichte (z.B. ländliche Gebiete, Weltmeere, Arktis, Antarktis, Wüsten, Steppen, Weideflächen).
Daher kann das Starlink-Netz eher als Ergänzung denn als Konkurrenz zu bestehenden Breitbandtechnologien gesehen werden, mit dem Teilnehmer eine Breitband-Grundversorgung erhalten können, die über bestehende Technologien weder wirtschaftlich noch mit Unterstützung von Fördermaßnahmen sinnvoll erschlossen werden können.
- Low-Latency-Anwendungen (z.B. Finanzindustrie, Militär, Online Gaming) über weite Entfernungen (> 1080 km), d.h. Intra- und Interkontinentalverbindungen.

Fazit (4)

- 5G-Backhaul- und Backbone für low-latency-Anwendungen mit moderaten Bitraten und/oder einer begrenzten Anzahl an Verbindungen. Non-Terrestrial Networks wie beispielsweise Satellitennetze werden ab der 3GPP Rel. 17 Bestandteil der 5G-Spezifikation sein.
- Backup für hochverfügbare, bestehende Breitbandverbindungen (z.B. für Geschäftskunden).
- Internetverbindungen zu mobilen Endstationen (Earth Stations in Motion) wie Automobile, Schiffe, Flugzeuge, 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)
- Anwendungen in der verarbeitenden Industrie
- Ggf. auch bestimmte IoT-Anwendungen bzw. IoT-Backhaul

Fazit (5)

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.