



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT



Lehrstuhl für Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Martensstr. 3
D-91058 Erlangen

Bewertung der Leistungsfähigkeit von Internet über Satellit

Jörg Deutschmann
Dr.-Ing. Kai-Steffen Hielscher
Prof. Dr.-Ing. Reinhard German

30. Juli 2021

Unterstützt durch



European Space Agency ARTES AT 5G METEORS MakerSpace

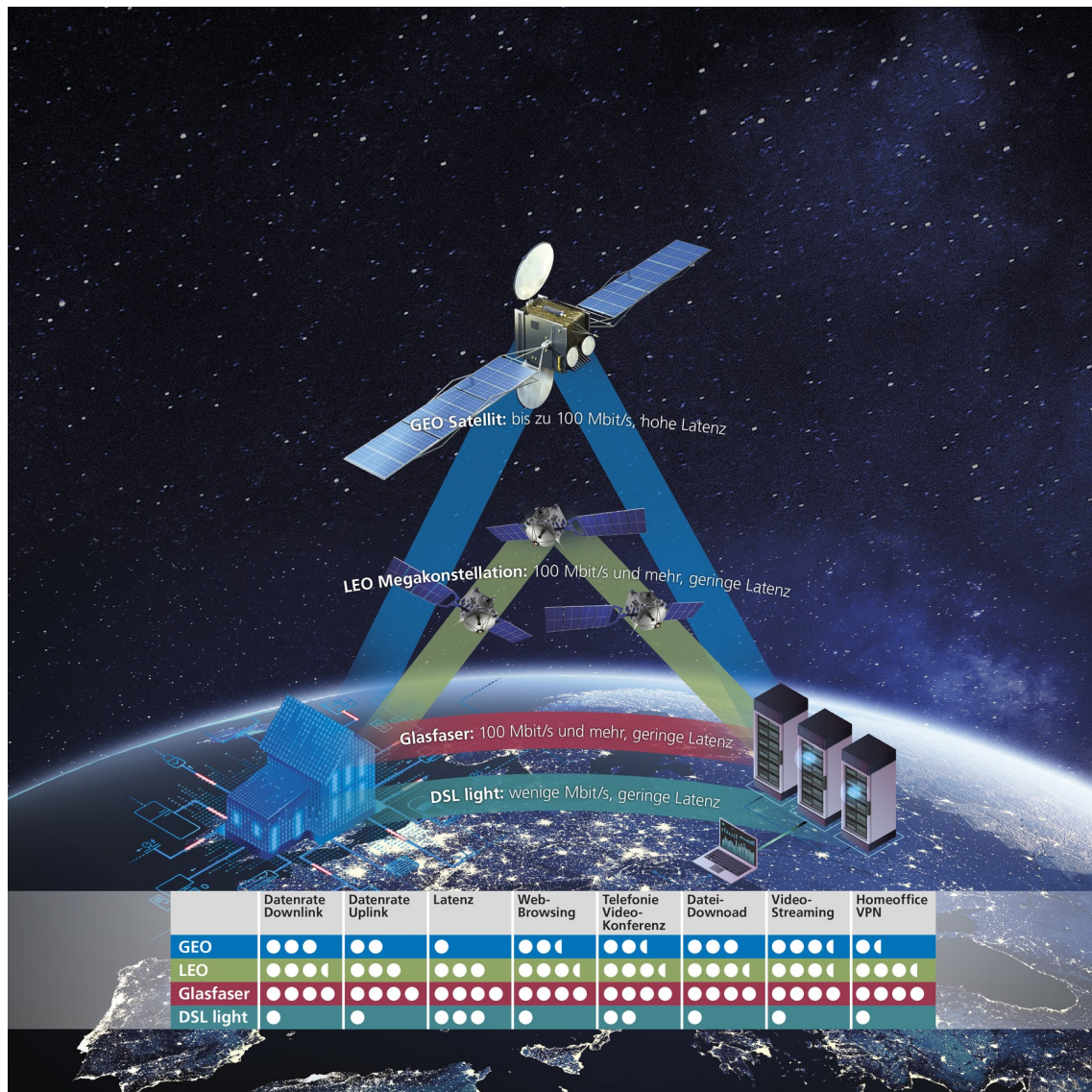


Deutsche
Raumfahrtagentur
im DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Leistungsfähigkeit verschiedener Anwendungen über verschiedene Internetzugangstechnologien bewertet, mit Fokus auf den Internetzugang über Satellit.



Bewertung unterschiedlicher Anwendungen und Internetzugangstechnologien basierend auf Messungen der FAU Erlangen-Nürnberg. Bildrechte: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

In Rahmen dieser Messkampagne wurden folgende Zugangstechnologien bzw. Anbieter ausgewählt:

- Geostationäre Satelliten (GEO)
Konnect/Eutelsat, skyDSL/Eutelsat, Bigblu/Eutelsat, Novostream/Astra Connect
- Satelliten-Megakonstellation in niedriger Umlaufbahn (LEO)
Starlink
- Terrestrische Systeme als Referenz
o2 DSL, Congstar LTE

Der Internetzugang über Satellit basiert genau wie terrestrische Internetzugänge auf dem Internetprotokoll (IP), d. h., es können prinzipiell alle Internetanwendungen sowie Telefonie genutzt werden. Die Datenraten der von uns ausgewählten Systeme sind ungefähr vergleichbar. Größter Unterschied von geostationären Satelliten (GEO) zu den anderen Systemen ist eine sehr hohe Signallaufzeit (Verzögerung, Latenz), welche sich auf die Leistungsfähigkeit bestimmter Anwendungen auswirken kann.

Geostationäre Satelliten

Im Folgenden wird die Bewertung von Anwendungen bei Verwendung von Internet über geostationäre Satelliten zusammengefasst:

Anwendung	Bewertung	Anmerkungen
E-Mail	$\oplus\oplus$	Ohne Einschränkungen verwendbar
Datei-Downloads, Software-Updates	$\oplus\oplus$	
Videostreaming	$\oplus\oplus$	
Web-Browsing	$\oplus$	Geringfügige Einschränkungen vorhanden
Telefonie (VoIP), Videokonferenzen	$\oplus$	
Virtual Private Network (VPN)	$\circ$	Funktionalität gegeben, Einschränkungen vorhanden
Latenzkritische Anwendungen	$\ominus$	Nicht nutzbar oder signifikante Einschränkungen vorhanden; individuelle Betrachtung der Anwendung notwendig

- Ohne Einschränkungen verwendbar

E-Mail, Datei-Downloads, Software-Updates, Videostreaming

Für diese Anwendungen spielt die hohe Latenz keine Rolle, der Internetzugang über geostationäre Satelliten ist uneingeschränkt möglich. Die Datenraten sind ausreichend für hochauflösendes Videostreaming.

- Geringfügige Einschränkungen vorhanden

Web-Browsing, Telefonie (VoIP), Videokonferenzen

Bei diesen Anwendungen kann sich die höhere Latenz auf die Leistungsfähigkeit auswirken. Ein Internetanschluss mit hoher Datenrate und geringer Latenz lädt eine Webseite innerhalb weniger Sekunden, während das Laden einer Webseite über eine geostationäre Satellitenverbindung mehrere Sekunden dauern kann. In der subjektiven Wahrnehmung kann dies aber unkritisch sein.

Telefonie ist mit hoher Sprachqualität möglich und auch Videokonferenzen sind über geostationäre Satellitenverbindungen durchführbar. Dies wurde exemplarisch sowie anhand von Datenrate, Latenz und VoIP-Ergebnissen bewertet. Referenzierte Literatur zeigt jedoch, dass eine hohe Latenz in Gesprächen von manchen Personen als störend empfunden wird.

- Funktionalität gegeben, Einschränkungen vorhanden

Virtual Private Networks (VPNs)

VPNs sind für den Einsatz im Homeoffice eine wichtige Anwendung. VPN-Verbindungen können aufgebaut sowie zuverlässig und stabil verwendet werden. Aufgrund der Funktionsweise von Internetprotokollen und der Systemarchitektur von geostationären Satellitensystemen kann jedoch die Performance eingeschränkt sein: Zum einen ist bei interaktiven Vorgängen (z. B. Navigieren im Dateisystem) die hohe Latenz mess- und spürbar, zum anderen werden vor allem beim Beginn von Übertragungen geringe Datenraten erreicht.

- Signifikante Einschränkungen vorhanden; individuelle Betrachtung notwendig

Latenzkritische Anwendungen

Latenzkritische Anwendungen (z. B. reaktionskritische Online-Multiplayer-Spiele oder Cloud-Gaming) sind nicht oder nur im Einzelfall verwendbar.

Bei der Anwendung von VPNs sowie weniger ausgeprägt bei Web-Browsing, Telefonie (VoIP) und Videokonferenzen kann es sein, dass ein terrestrischer Internetzugang mit geringer Datenrate und geringer Latenz eine bessere Performance erzielt als ein geostationärer Satellitenzugang mit hoher Datenrate und hoher Latenz. Es ist hier aber schwierig, einen konkreten Schwellwert für Datenrate bzw. Latenz anzugeben. Bei anderen Anwendungen (insbesondere Datei-Downloads, Software-Updates und Videostreaming) bietet ein Internetzugang über geostationäre Satelliten gegenüber einem Anschluss mit geringer Datenrate deutliche Vorteile.

Megakonstellationen in niedriger Umlaufbahn

Im Vergleich zu geostationären Satelliten haben Megakonstellationen in niedriger Umlaufbahn (LEO von engl. Low Earth Orbit) eine geringe Signallaufzeit bzw. Latenz. Aktuell werden solche Megakonstellationen für den Breitband-Internetzugang geplant und aufgebaut. Bei der amerikanischen Firma SpaceX ist eine Registrierung für den Beta-Test von Starlink möglich, was für diese Messkampagne auch wahrgenommen wurde. Erste Messergebnisse zeigen, dass geringe Latenzen und hohe Datenraten erreicht werden können, vergleichbar mit terrestrischen Systemen. Bei den erreichbaren Datenraten gibt es noch große Schwankungen. Hier gilt es, in naher Zukunft weitere Messungen durchzuführen. Kosten für Hardware, monatliche Gebühren und auch Stromverbrauch sind aktuell vergleichsweise hoch.

Allgemeine Anmerkungen

Hardware und Montage: Für geostationäre Satellitensysteme muss eine Parabolantenne montiert und nach Süden ausgerichtet werden. Bei einem Anbieter ist die Montage inbegriffen, bei anderen Anbietern kann diese selbst vorgenommen (entsprechende Anleitungen werden zur Verfügung gestellt) oder gegen Aufpreis ein Montageauftrag erteilt werden. Die Starlink-Antenne erfordert eine freie Rundumsicht, dies kann mittels einer Smartphone-App überprüft werden. Alle Anbieter stellen ein Modem bzw. Router bereit, an welchem ein oder mehrere PCs angeschlossen werden können.

Shared Medium: Bei funkbasierten Systemen (GEO- und LEO-Satelliten, LTE) teilen sich mehrere Teilnehmer vorhandene Kapazitäten (sog. *Shared Medium*), d. h., bei hoher Netzwerkaktivität kann es zu Engpässen und reduzierten Datenraten kommen. Dieser Effekt hängt unter anderem vom Standort, Tarif und der Anzahl der Teilnehmer ab. Im Rahmen dieser Messungen konnte dieser Effekt exemplarisch nachvollzogen werden, eine allgemeingültige Bewertung ist aber nicht möglich.

Wettereinflüsse: Bei zwei geostationären Satellitennetzwerken konnte Anfang Februar 2021 eine Leistungsminderung bedingt durch starken Schneefall festgestellt werden. Weitere wetterbedingte Einflüsse wurden nicht festgestellt.

Gültigkeit der Messungen: Die Internetzugänge wurden im Namen der FAU, d. h. nicht anonym, bestellt. Aufgrund der begrenzten Auswahl aus Anbietern bzw. Tarifen, Standort, sowie Zeitraum, beschreiben die vorgestellten Messergebnisse eine Momentaufnahme. Des Weiteren unterliegen Computernetzwerke und Anwendungen ständigen Veränderungen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Betrachtete Systeme	7
3	Messaufbau	9
3.1	Anwender-PCs (Clients)	9
3.2	Internet-Server	10
3.3	Performance Enhancing Proxies (PEPs) und VPN-Software	10
4	Ergebnisse	11
4.1	Datenraten – Bulk Data Transfer	12
4.1.1	Download-Datenrate	12
4.1.2	Upload-Datenrate	16
4.1.3	Zeitliche Abhängigkeit der Datenrate, Wettereinflüsse	19
4.2	Latenz (Verzögerung, Round Trip Time)	20
4.3	Paketverluste	22
4.4	Zugriff auf Netzlaufwerke – Windows File Sharing	23
4.4.1	Anzeigen von Ordnerinhalten	23
4.4.2	Download von Dateien	24
4.5	HTTP Datei-Download	25
4.6	Videostreaming	27
4.7	Laden von Webseiten	27
4.7.1	Initiales Laden von Webseiten	28
4.7.2	Erneutes Laden von Webseiten mit Adblocker	30
4.8	Telefonie – Voice over IP (VoIP)	32
4.8.1	Dauer Verbindungsaufbau	32
4.8.2	Sprachqualität – Mean Opinion Score (MOS)	32
5	Zusammenfassung	34
6	Literatur	35

1 Einleitung

In der modernen Gesellschaft und Arbeitswelt ist ein leistungsfähiger Internetanschluss unabdingbar. Bisher nicht oder nur schlecht versorgte Regionen können schon heute per Internet über Satellit versorgt werden. Um die Leistungsfähigkeit von Internet über Satellit einzuschätzen, wurde der Lehrstuhl Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg beauftragt, eine Messkampagne durchzuführen.

Hintergrund ist die Reform des Telekommunikationsgesetzes (TKG) und die Bereitstellung eines Universaldienstes [1]. Zwei Dokumente sind in diesem Zusammenhang relevant, welche Anwendungsszenarien, Eigenschaften und Dienstgütern eines Universaldienstes spezifizieren:

- Europäischer Kodex für die elektronische Kommunikation (engl. *European Electronic Communications Code*, kurz EECC) [2]
- Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Guidelines detailing Quality of Service Parameters [3]

Im EECC-Dokument [2] wird in Anhang V ein „*Mindestangebot an Diensten, die ein angemessener Breitbandinternetzugangsdienst ... unterstützen können muss*“ aufgelistet:

- (1) E-Mail
- (2) Suchmaschinen, die das Suchen und Auffinden aller Arten von Informationen ermöglichen
- (3) grundlegende Online-Werkzeuge für die Aus- und Weiterbildung
- (4) Online-Zeitungen oder Online-Nachrichten
- (5) Online-Einkauf oder Online-Bestellung von Waren und Dienstleistungen
- (6) Arbeitssuche und Werkzeuge für die Arbeitssuche
- (7) berufliche Vernetzung
- (8) Online-Banking
- (9) Nutzung elektronischer Behördendienste
- (10) soziale Medien und Sofortnachrichtenübermittlung
- (11) Anrufe und Videoanrufe (Standardqualität)

In den BEREC-Guidelines [3] werden verschiedene quantitativ messbare Dienstgüteeigenschaften (engl. *Quality of Service*, kurz QoS) aufgelistet:

- Voice – Call set-up time, Unsuccessful call rate, Speech transmission quality, Response time for calls to the operator, customer service and directory assistance
- Mobile – Network availability, Probability of successful connection in an area covered by the network, Dropped call ratio
- Customer service – Time between request for service and start of service, Fault frequency, Time to troubleshoot and eliminate faults, Frequency of complaints about billing
- Internet – Data transfer speed, Web page loading time, Latency, Jitter, Packet loss rate

Der Fokus dieser Messkampagne liegt auf der Bewertung technischer Metriken der Kategorie *Internet*. Bei Sprachanwendungen (*Voice*) wird die Dauer von Verbindungsaufbau (*Call set-up time*) und Sprachqualität (*Speech transmission quality*) ermittelt. Mobilfunk (*Mobile*) und Kundenservice (*Customer service*) werden in dieser Messkampagne nicht berücksichtigt.

Subjektiv empfundene Leistungsfähigkeit

Im Gegensatz zu quantitativ messbaren QoS-Metriken unterscheidet sich die subjektive Wahrnehmung der Dienstgüte des Systems (engl. *Quality of Experience*) von Person zu Person. Beispielsweise empfindet Person A eine Ladezeit einer Website von mehreren Sekunden als störend, während dies für Person B unerheblich ist. Studien zur subjektiven Wahrnehmung der Qualität eines Internetzugangs über Satellit sind nicht Teil dieser Messungen.

Dokumentenstruktur

In Kapitel 2 werden die getesteten Internetzugangstechnologien beschrieben. Kapitel 3 zeigt den Messaufbau. Der Hauptteil dieses Dokuments besteht aus den in Kapitel 4 präsentierten Ergebnissen, untenstehende Tabelle dient als Übersicht. Abschließend gibt es in Kapitel 5 eine Zusammenfassung.

Setup	Parameters	VPN	Client OS	Remote Server
Bulk Data Transfer Abschnitt 4.1	Uplink, Downlink Anzahl Flows	ohne, OpenVPN, Wireguard	Linux	Linux (DFN, Azure, AWS)
Round Trip Times Paketverluste Abschnitt 4.2 und 4.3	Paketgröße 56/1000 Byte Sendeintervall 0.1s/1s/5s	ohne	Linux	Linux (DFN, Azure, AWS)
Windows File Sharing Abschnitt 4.4	1x 10 MB, 10x 1 MB Dateiordner öffnen	ohne, OpenVPN, Wireguard	Win10	Linux (DFN, Azure, AWS) Windows (Azure)
HTTP Datei- Download Abschnitt 4.5	HTTP/1.1	ohne, OpenVPN, Wireguard	Win10	Linux (DFN)
Videostreaming Abschnitt 4.6	Youtube-Videos	ohne	Win10	Internet (Youtube)
Ladezeit von realen Webseiten Abschnitt 4.7	Initial/Cached Ohne/mit Adblocker	ohne	Win10 Linux	Internet
Voice over IP Abschnitt 4.8	Verbindungsaufbau MOS	ohne	Linux	Linux (DFN)

2 Betrachtete Systeme

Um einen umfassenden Einblick zu erhalten, werden mehrere Zugangstechnologien und unterschiedliche Anbieter bzw. Tarife berücksichtigt. Folgende Tabelle zeigt einen Überblick:

Anbieter Tarif	Technologie	Downlink	Uplink	Hardware (ca. Strom- verbrauch)	Volumen- begrenzung	Kosten/ Monat
Konnect Zen (Eutelsat)	Geostationärer Satellit 7,2° Ost	50 Mbit/s	5 Mbit/s	WLAN-Router Hughes HT2000W (25 W)	Priorisierung bis 60 GB	44,99 €
skyDSL2+ Zuhause L Premium (Eutelsat)	Geostationärer Satellit 9° Ost	40 Mbit/s	2 Mbit/s	WLAN-Router ViaSat RM5111 (30 W)	ohne	39,90 €
Premium (siehe Anmerkungen)		50 Mbit/s	6 Mbit/s			inklusive
Streaming-Option (siehe Anmerkungen)						8,90 €
Bigblu Broadband Plc Konnect Bronze DE (Eutelsat)	Geostationärer Satellit 9° Ost	16 Mbit/s	3 Mbit/s	Modem ViaSat SurfBeam 2 RM4100 (32 W)	Priorisierung bis 10 GB	31,90 €
Novostream Astra Connect L+	Geostationärer Satellit 28,2° Ost	20 Mbit/s	2 Mbit/s	Modem Gilat SkyEdge II-c (27 W)	ohne	54,90 €
SpaceX Starlink Beta (siehe Anmerkungen)	Megakonstellation in niedriger Umlaufbahn	-	-	WLAN-Router Starlink UTR-201 (90–110 W)	ohne	99,00 €
Congstar LTE Homespot 100	LTE	50 Mbit/s	25 Mbit/s	WLAN-Router Alcatel HH71VM LTE cat7 (4 W)	Drosselung auf 384 kbit/s ab 100 GB	30,00 €
o2 DSL Max flat	DSL	50 Mbit/s	10 Mbit/s	WLAN-Router FritzBox 7490 (9 W)	ohne	24,90 €

Anmerkungen und Details zu den betrachteten Systemen:

Auswahlkriterien für gewählte Tarife: Bei terrestrischen und geostationären Internetzugangstechnologien gibt es diverse Anbieter mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Tarife. Beim Internetzugang über geostationäre Satelliten ist ein günstiger Tarif beispielsweise der *skyDSL2+ Zuhause S* (18 Mbit/s Downlink, 1 Mbit/s Uplink, 8 GB Datenvolumen, 12,90 € monatlich). Ein Tarif mit hoher Datenrate im Downlink ist z. B. *Konnect Max* (100 Mbit/s Downlink, 5 Mbit/s Uplink, 69,99 € monatlich). Im Rahmen dieser Messkampagne wurden zur besseren Vergleichbarkeit möglichst Tarife mit einer Downlink-Datenrate von 50 Mbit/s gewählt, was bei DSL eine häufig verwendete Datenrate ist. Novostream bietet ausschließlich 20 Mbit/s Downlink und 2 Mbit/s Uplink an, zum Vergleich mit einem ähnlich schnellen geostationären Internetanschluss wurde der Tarif *Bigblu Konnect Bronze* verwendet. LTE bietet häufig höhere Datenraten an, in diesem Fall wurde aber der Anbieter Congstar gewählt, welcher einen Tarif mit 50 Mbit/s im Downlink anbietet.

skyDSL Premium und Streaming-Option: Laut Produktinformationsblatt¹ bietet der gewählte skyDSL-Tarif eine maximale Datenrate von 40 Mbit/s im Downlink und 2 Mbit/s im Uplink. Im Bestellprozess ist für diesen Tarif die Premium-Option², welche mit 50 Mbit/s im Downlink und 6 Mbit/s im Uplink beworben wird, kostenfrei verfügbar. Die Streaming-Option³ ermöglicht „eine erhöhte Bandbreite von bis zu 50 Mbit/s, optimiert für das gelegentliche Streaming“ ohne weitere technische Details zu nennen. Im Rahmen dieser Messungen wurde die Streaming-Option gebucht.

¹<https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden/Satelliten-Internet/legal/pinfo/skydsl2p?tariff=345>

²<https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden/Satelliten-Internet/tariff/details/345>

³<https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden/Satelliten-Internet/tariff/options/351>

Starlink Beta-Test: Bei Starlink handelt es sich um einen Vorab-Test (Beta-Test), für welchen eine vorherige Registrierung notwendig ist. Aktuell sind keine nominellen Datenraten spezifiziert. Daher sollten alle Messergebnisse des Starlink-Internetzugangs als vorläufig betrachtet werden.

Kosten für Hardware (Stand 05/2021): Die Kosten für Hardware unterscheiden sich je nach System. Beim Anbieter Konnect ist die Hardware inbegriffen, für die Installation werden einmalige Kosten (regulär 349,- €, Aktionspreis 99,- €) verlangt. skyDSL bietet die Hardware als Mietkauf (69,90 € einmalig und 24 Monate je 9,90 €) oder zur Miete (69,90 € einmalig, je Monat 4,90 €) an. Bigblu nimmt im Rahmen einer Übernahme durch Eutelsat aktuell keine neuen Kunden mehr an, daher sind hier keine Preise für Hardware verfügbar. Bei Novostream kann Antenne und Modem für einmalig 369,- € gekauft werden oder monatlich gemietet werden (24 Monate zu je 11,90 €; danach 5,90 € pro Monat oder 29,- € einmalig zum Kauf). Starlink verlangt 499,- € für Hardware und 59,- € Versandkosten. Bei Congstar ist ein LTE-Router notwendig, bei DSL ein entsprechender DSL-Router. Anders als bei den Satellitensystemen gibt es hier eine große Auswahl an Hardware, günstige Geräte gibt es ab ca. 50,- € oder werden bei längerfristigen Verträgen zur Verfügung gestellt.

Traffic-Management: Besonders bei funkbasierten Systemen wenden Netzbetreiber üblicherweise Mechanismen zur Beeinflussung und Steuerung des Netzwerkverkehrs an (engl. *Traffic-Management*). Konnect verwendet eine Fair Use Policy⁴ (FUP), in dem gewählten Tarif werden die ersten 60 GB pro Abrechnungszeitraum im Netzwerk höher priorisiert. Laut E-Mail Eutelsat hat die Priorisierung aktuell noch keine Auswirkung, da dieses System erst seit kurzem in Betrieb ist und noch wenig Kunden hat. skyDSL verwendet Pools bzw. Contention-Ratios⁵. Bigblu verwendet ebenfalls eine Fair Use Policy⁶ (FUP) mit Priorisierung; aufgrund des gewählten Tarifs und der geringen priorisierten Datenmenge wurden alle Messungen durchgeführt, nachdem diese überschritten wurde. Bei Novostream, Starlink und DSL gibt es aktuell keine Priorisierung oder Drosselung. Bei Congstar wird nach dem Verbrauch einer Datenmenge von 100 GB Daten auf 384 kbit/s gedrosselt, gegen Aufpreis kann zusätzliches Datenvolumen freigeschaltet werden, die hier vorgestellten Messergebnisse wurden durchgeführt, bevor die Volumenbegrenzung erreicht wurde.

Nicht berücksichtigter Anbieter: In der Vergangenheit war in Deutschland ein weiterer Betreiber von Internet über geostationäre Satelliten die Avanti Communications Group PLC. Eine Internetrecherche lieferte keine Ergebnisse, ob in Deutschland aktuell Tarife für Endkunden bestellbar sind, auf eine Nachfrage per E-Mail wurde nicht geantwortet. Daher wurde dieser Betreiber nicht in die Messungen aufgenommen.

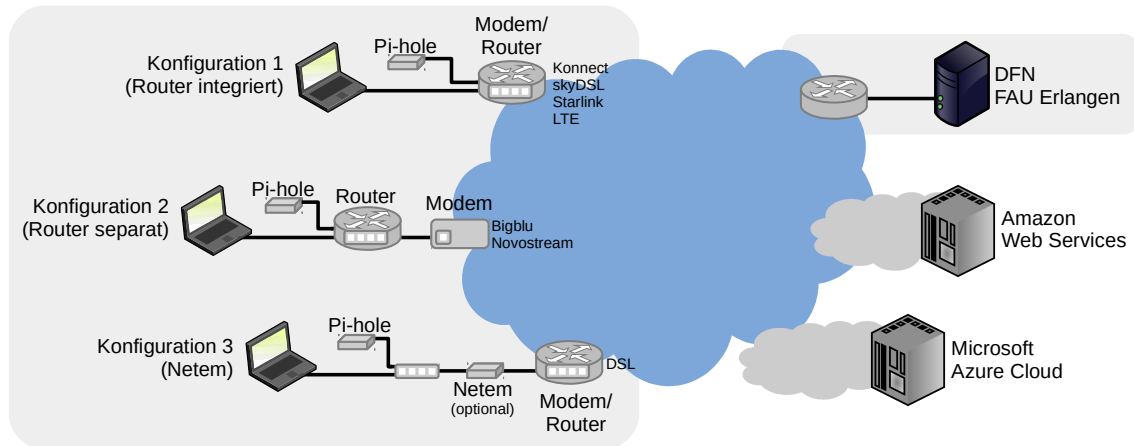
⁴https://europe.konnect.com/sites/europe/files/2020-11/de_fair_use_policy.pdf

⁵<https://www.skydsl.eu/de-DE/Privatkunden/Satelliten-Internet/info/faq/contract>

⁶https://bigbluinternet.de/wp-content/uploads/2020/05/Fair-Use-Policy-FUP_fin.pdf

3 Messaufbau

Folgende Abbildung zeigt den Messaufbau:



Links im Bild sind die Endnutzer-Geräte (Client-PCs, Router bzw. Modem, Satelliten-Antennen) dargestellt, rechts im Bild die Server welche über das Internet erreichbar sind. Alle in der Abbildung hellgrau hinterlegten Komponenten sowie die Satelliten-Antennen wurden auf dem Informatik-Gebäude der Universität Erlangen (Martensstr. 3, D-91058 Erlangen) montiert. Details zu den Cloud-Servern siehe unten.

Viele Netzbetreiber vergeben keine (oder nur gegen Aufpreis) öffentliche IP-Adressen. Daher werden alle Verbindungen stets vom Client zum Server aufgebaut. Bei der Flussrichtung von Daten gilt:

- Die Richtung vom Anwender-Client zum Internet-Server wird in diesem Dokument als **Upload** bezeichnet (in der Satellitenkommunikation als *Return-Link* definiert, in terrestrischen Netzwerken auch als *Uplink* oder *Upstream* bekannt).
- Die Richtung vom Internet-Server zum Anwender-Client wird in diesem Dokument als **Download** bezeichnet (in der Satellitenkommunikation als *Forward-Link* definiert, in terrestrischen Netzwerken auch als *Downlink* oder *Downstream* bekannt).

3.1 Anwender-PCs (Clients)

Pro betrachtetem System steht ein PC zur Verfügung, welcher per kabelgebundenem Gigabit-Ethernet an einen Router angeschlossen ist. Auf Anwenderseite gibt es drei unterschiedliche Konfigurationen:

- Konfiguration 1: Bei Konnect, skyDSL, Starlink und LTE wird vom Betreiber ein Router bereitgestellt, an welchem Client-PCs direkt angeschlossen werden können.
- Konfiguration 2: Bei Bigblu und Astra wird nur ein Modem zur Verfügung gestellt, daher wird hier ein zusätzlicher Router (GL.iNet GL-AR750 mit OpenWRT 19.07.7) verwendet.
- Konfiguration 3: Beim DSL Anschluss wird optional ein Raspberry Pi 3 B+ mit der Linkemulation-Software **netem** (von engl. *Network Emulation*) verwendet, um unterschiedliche Datenraten zu emulieren.

Zusätzlich wird an jedem Internetanschluss ein Raspberry Pi 3 B+ mit der Ad-Blocker-Software Pi-Hole zur Verfügung gestellt. Sowohl Pi-hole als auch die Linkemulation am DSL-Anschluss sind nur bei den Messungen in Abschnitt 4.7 Ladezeit von Webseiten relevant.

Bei den PCs handelt es sich um Dell Optiplex 9020 (Intel Core i5-4590, 8 GB RAM, 240 GB SSD, 1 Gbit/s Ethernet). Auf den PCs steht als Betriebssystem wahlweise zur Verfügung:

- Ubuntu 18.04.5 LTS
- Windows 10 Pro 20H1

3.2 Internet-Server

Es stehen verschiedene Gegenstellen bzw. Server bereit:

- DFN X-WiN (FAU Erlangen-Nürnberg), Peering siehe [4], Ubuntu 18.04.5 LTS (Intel Core i5-6500, 8 GB RAM, 240 GB SSD, 1 Gbit/s Ethernet).
- Microsoft Azure Cloud Virtual Machine `germanywestcentral`, Ubuntu 18.04.5 LTS, Image D2 v2
- Microsoft Azure Cloud Virtual Machine `germanywestcentral`, Windows 10 Pro 20H1, Image D2 v2
- Amazon AWS EC2 `eu-central-1`, Ubuntu 18.04.5 LTS, Instance `t3.small`

3.3 Performance Enhancing Proxies (PEPs) und VPN-Software

In geostationären Satellitennetzwerken kommen sogenannte Performance Enhancing Proxies (PEPs) zum Einsatz [5, 6]. Diese TCP-Proxies beschleunigen den Protokollablauf von TCP-Verbindungen, da viele TCP-Parameter standardmäßig nicht für Übertragungskanäle mit hohen Latenzen ausgelegt sind. Die TCP-Verbindung wird hierbei in mehrere Teilabschnitte aufgeteilt (engl. *Split TCP*) ohne dass dies ein normaler Anwender bemerkt.

Virtual Private Networks (VPNs) dienen zur sicheren Kommunikation durch verschlüsselte Verbindungen. VPN-Protokolle basieren auf dem Internetprotokoll, daher ist deren Verwendung grundsätzlich bei allen Internetanschlüssen möglich. Auch bei geostationären Satellitennetzwerken können VPN-Verbindungen aufgebaut und anschließend zuverlässig und stabil verwendet werden. Allerdings können PEPs nicht in verschlüsselte Verbindungen eingreifen, d. h. TCP-Verbindungen in Kombination mit VPNs können in geostationären Satellitennetzwerken nicht optimiert werden. Durch die fehlende Optimierung ist eine verminderte Leistungsfähigkeit zu erwarten.^{7,8}

In den Messungen wird OpenVPN und Wireguard als VPN-Software verwendet, diese wird direkt auf den Clients bzw. Servern gestartet, d. h. ohne weiteres Routing. Die verwendeten Softwareversionen unter Linux sind:

- OpenVPN 2.4.4 (Ubuntu apt-repository)
- Wireguard v1.0.20200513 (Ubuntu apt-repository)

Unter Windows werden folgende Versionen verwendet:

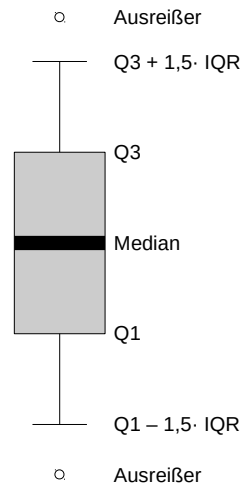
- OpenVPN Connect 3.2.3.(1851)
<https://openvpn.net/client-connect-vpn-for-windows/>
- WireGuard/0.3.9
<https://www.wireguard.com/install/>

⁷Auch bei dem kürzlich standardisierten QUIC-Protokoll (RFC 9000) sind PEPs aufgrund verschlüsselter Header nicht anwendbar. Andererseits bietet QUIC neue Features welche für geostationäre Satellitenverbindungen von Vorteil sind. Eine Analyse dieses neuen Protokolls ist nicht Teil dieser Messkampagne.

⁸Verschlüsselte Verbindungen können außer von VPN-Software auch durch andere Protokolle (z. B. `https`) bereitgestellt werden, welche PEPs nicht unwirksam machen. Änderungen an bestehender IT-Infrastruktur, um VPN-Software durch andere Lösungen zu ersetzen und dadurch eine bessere Performance bei Nutzung von geostationären Satellitenverbindungen zu erreichen, dürften aber in der Praxis in den meisten Fällen nicht praktikabel sein.

4 Ergebnisse

Ergebnisse werden unter anderem in Boxplots dargestellt, diese sind wie folgt definiert (Standardeinstellungen von R):



- Median (50%-Quantil): Schwarze Linie innerhalb der Box; die Hälfte aller Werte sind kleiner gleich bzw. größer als der Median.
- Unteres Quartil $Q1$ (25%-Quantil): Untere Begrenzung der Box; ein Viertel aller Werte sind kleiner gleich $Q1$, drei Viertel aller Werte sind größer $Q1$.
- Oberes Quartil $Q3$ (75%-Quantil): Obere Begrenzung der Box; drei Viertel aller Werte sind kleiner gleich $Q3$, ein Viertel aller Werte sind größer $Q3$.
- Whisker, definiert als $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bzw. $Q3 + 1,5 \cdot IQR$, wobei der Interquartilsabstand (engl. Interquartile Range) $IQR = Q3 - Q1$ (Hälfte aller Werte) ist.
- Werte außerhalb der Whisker sind Ausreißer und werden durch einzelne Punkte dargestellt.

4.1 Datenraten – Bulk Data Transfer

Datenrate, Latenz und Zuverlässigkeit sind die wesentlichen Merkmale eines Internetanschlusses. Die Datenrate kann hierbei durch die Übertragung einer großen Menge von zufällig generierten Daten ermittelt werden (engl. *Bulk Data Transfer*). Für relevante Literatur zu Datenraten-Messungen über geostationäre Satellitenverbindungen siehe [5] und [7].

Es wird unterschieden, ob eine oder mehrere TCP-Verbindungen (engl. *TCP Flows*) verwendet werden. Eine Anwendung baut üblicherweise nur eine einzelne TCP-Verbindung auf, daher ist die erreichbare Datenrate einer einzelnen TCP-Verbindung eine wichtige Metrik. Wenn im Heimnetzwerk mehrere PCs und/oder Anwendungen gleichzeitig genutzt werden, werden mehrere parallele TCP-Verbindungen verwendet. Aufgrund von Protokollmechanismen können mehrere TCP-Verbindungen einen zur Verfügung stehenden Kanal besser auslasten als eine einzelne TCP-Verbindung, d. h. mehrere parallele TCP-Verbindungen sollten verwendet werden, um die maximale Kapazität des Internetanschlusses zu testen.

Während der Netzbetreiber die Datenrate der physikalischen Leitung ohne Overhead von Netzwerkprotokollen angibt („Brutto“-Datenrate, engl. *Throughput*), wird in Messungen üblicherweise die der Anwendung zur Verfügung stehende Datenrate angegeben („Netto“-Datenrate, engl. *Goodput*). Es gilt hierbei stets: $\text{Goodput} < \text{Throughput}$. Der Unterschied hängt hierbei von Protokollen und Art der Daten ab, für Bulk Data Transfer beträgt dieser wenige Prozent.

Messaufbau für alle folgenden Abschnitte:

- Tool: **iperf 3.1.3** mit Übertragungsdauer von 30 s (`--time`)
- 1 oder 10 parallele TCP-Flows (`--parallel`)
(10 Flows wurden gewählt, da diese Anzahl repräsentativ für mehrere PCs und/oder Anwendungen ist und auch häufig bei Speed-Test-Tools verwendet wird)
- VPNs: ohne, OpenVPN, Wireguard
- Client: Linux
(Messungen mit Windows wurden ebenfalls durchgeführt aber nicht in der Auswertung berücksichtigt: Die **iperf**-Implementierung unter Windows hatte Performance-Probleme, was insbesondere bei der Download-Datenrate von Starlink aufgefallen ist, da nur Werte bis ca. 50 Mbit/s erreicht wurden; der Grund für dieses Verhalten wurde nicht ermittelt)
- Server: Linux (DFN, Azure, AWS)
- 100 Iterationen je Betreiber und Konfiguration (d. h. jeder gezeigte Boxplot basiert auf 100 Messwerten)

Hinweis zu den Abbildungen: Im zeitlichen Verlauf wird die Datenrate in 1-Sekunden-Intervallen betrachtet. In jedem Intervall wird der arithmetische Mittelwert der 100 Messwerte ermittelt und als Punkt dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wird für diese Punkte eine polynomiale Regression (R **loess**-Funktion mit $\alpha\text{-span} = 0,6$) angewendet und als Linie gezeichnet.

Im Boxplot wird die Datenrate über die Übertragungsdauer von 15 s bis 30 s ausgewertet. Dieser Zeitraum wurde verwendet, da sich die Datenrate ab 15 s bei allen Messungen eingeschwungen hat (engl. *Steady-State*). Bei der Mittelung der Datenrate über das Intervall von 15 s bis 30 s sind kurzzeitige Schwankungen nicht mehr erkennbar, entsprechend zeigt vorhandene Varianz in den Ergebnissen, dass die Datenrate trotz einer Mittelung über eine Dauer von 15 s nicht konstant zur Verfügung steht.

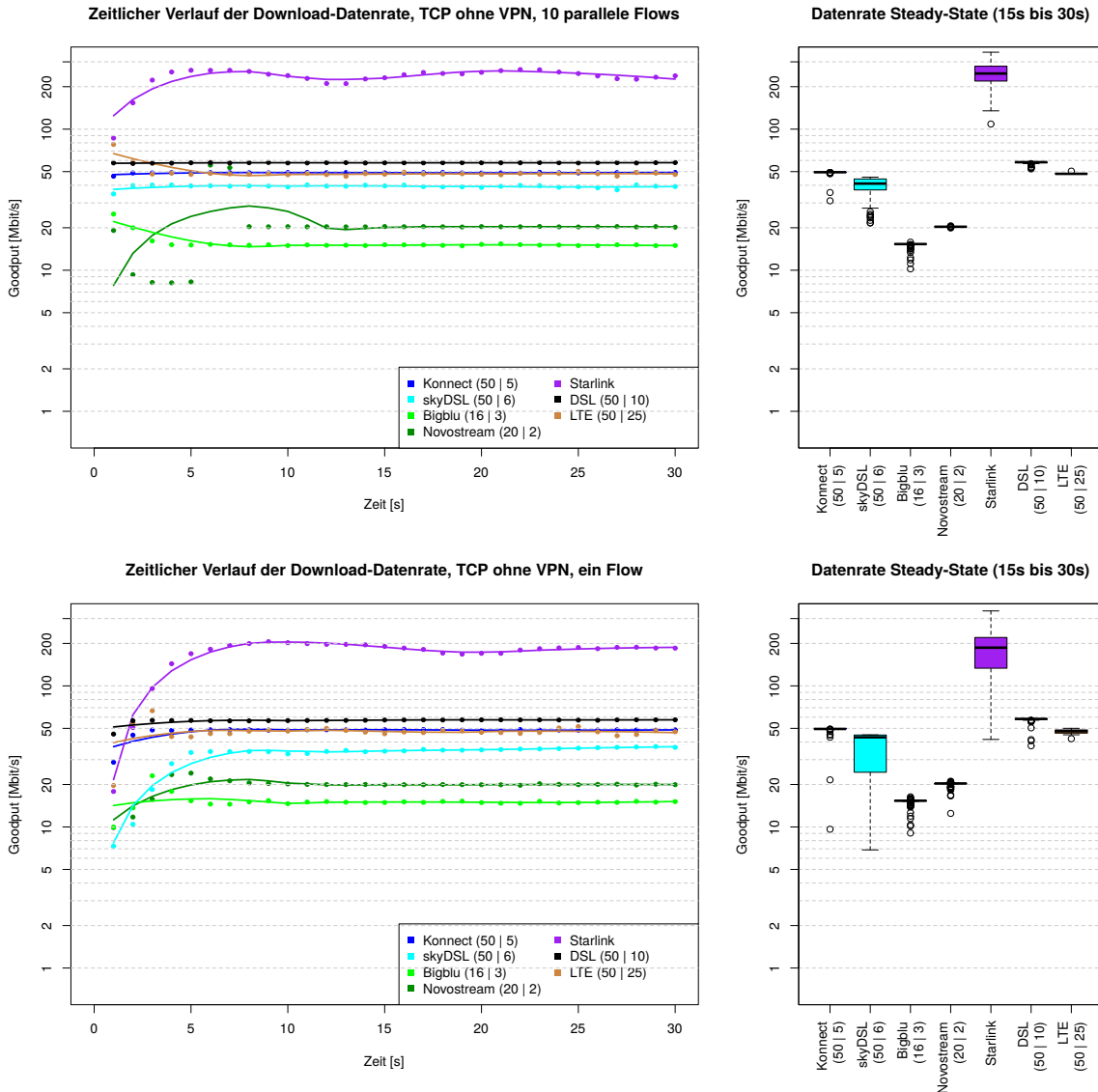
4.1.1 Download-Datenrate

Die Download-Datenrate wird von Netzbetreibern in Angeboten häufig primär hervorgehoben. Im Folgenden wird daher zunächst die Datenrate im Downlink gemessen und mit den Herstellerangaben verglichen.

Messaufbau siehe oben. Bei **iperf3** wird der Parameter `--reverse` verwendet, welcher Daten vom Server zum Client sendet (Download).

Download-Datenrate – TCP ohne VPN

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, werden TCP-Verbindungen in geostationären Satellitennetzwerken von PEPs optimiert.



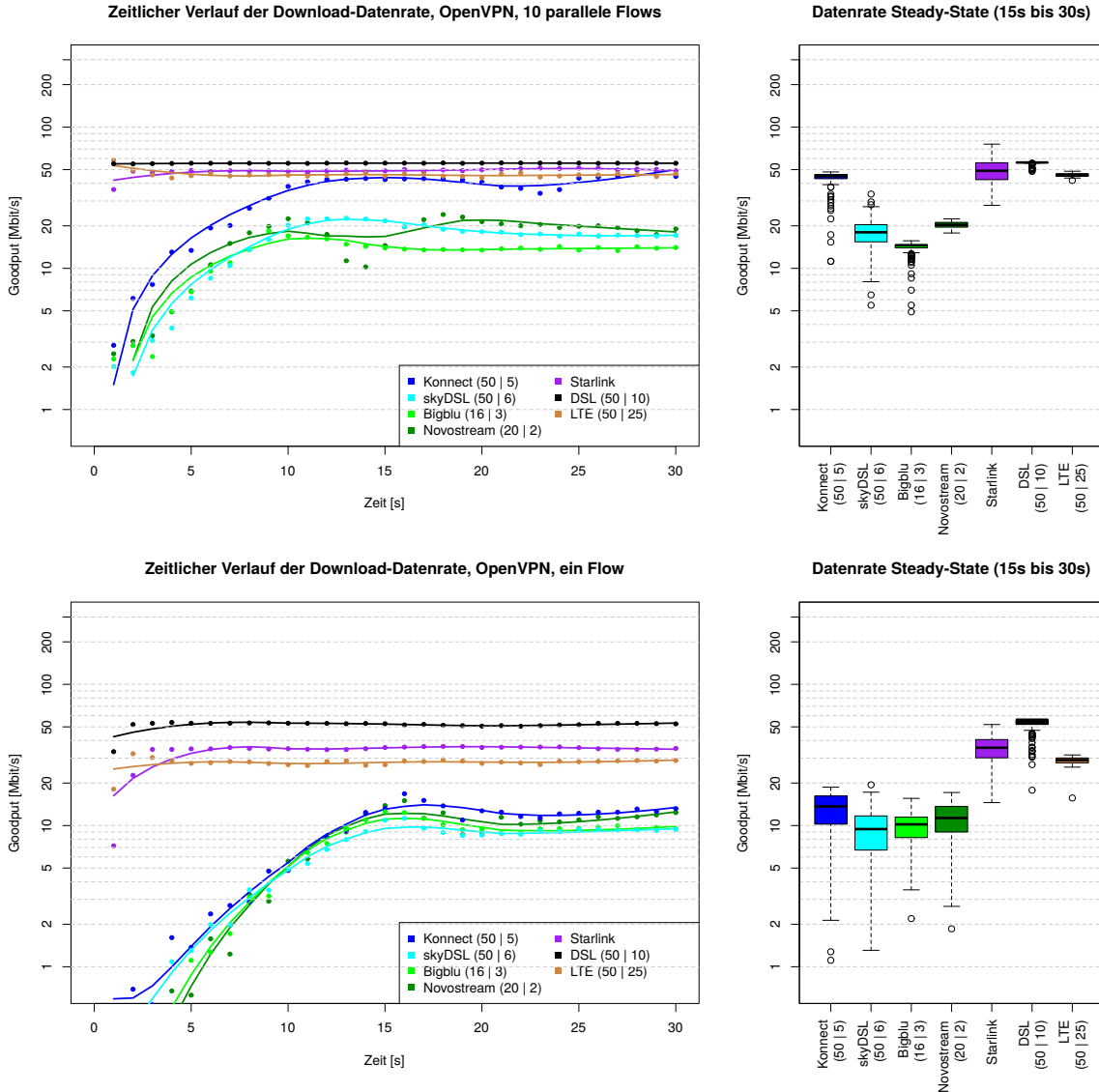
Ergebnisse:

- Die vereinbarten Datenraten werden eingehalten, lediglich skyDSL erreicht manchmal weniger als die beworbenen 50 Mbit/s.⁹ Bei Konnect, Novostream und Congstar LTE erreicht sogar der Goodput die spezifizierten Übertragungsraten, beim DSL-Anschluss ist dies noch positiver, hier werden knapp 60 Mbit/s im Goodput erreicht obwohl laut Anbieter nur eine Linkkapazität von 50 Mbit/s zur Verfügung gestellt wird. Starlink spezifiziert im Beta-Test keine Werte, die erreichten Datenraten sind jedoch hoch.
- Die Verwendung von einem oder mehreren Flows macht keinen nennenswerten Unterschied bei diesen Messungen, lediglich bei skyDSL und Starlink sind die Datenraten bei Verwendung eines Flows weniger stabil.
- Bei den Anbietern skyDSL, Novostream und Starlink dauert es einige Sekunden, bis sich die Empfangsdatenrate auf den Steady-State eingeschwungen hat. Da die Werte aber auch zu Beginn hoch sind, hat dies in der Praxis kaum Auswirkungen. Grund für dieses Verhalten könnte das Traffic-Management des Netzwerkbetreibers sein.

⁹Die 50 Mbit/s beziehen sich auf die beworbene Premium-Option, nicht das Produktinformationsblatt. Siehe hierzu die Anmerkungen zu skyDSL in Abschnitt 2 Betrachtete Systeme. Es gilt auch zu bedenken, dass der Goodput stets kleiner ist als der Throughput und die erzielten Datenraten daher noch akzeptabel sind.

Download-Datenrate – OpenVPN

Bei VPN-Lösungen wie z. B. OpenVPN oder Wireguard können die TCP-Proxies des Netzwerkbetreibers nicht eingesetzt werden, wodurch die Performance von TCP-Verbindungen sinkt. Paketverluste und Verbindungen anderer Geräte im Heimnetzwerk können hier zusätzlich problematisch sein; dies wurde im Rahmen dieser Messungen jedoch nicht untersucht. OpenVPN ist eine weitverbreitete VPN-Software, welche als sicher und bedienungsfreundlich gilt.

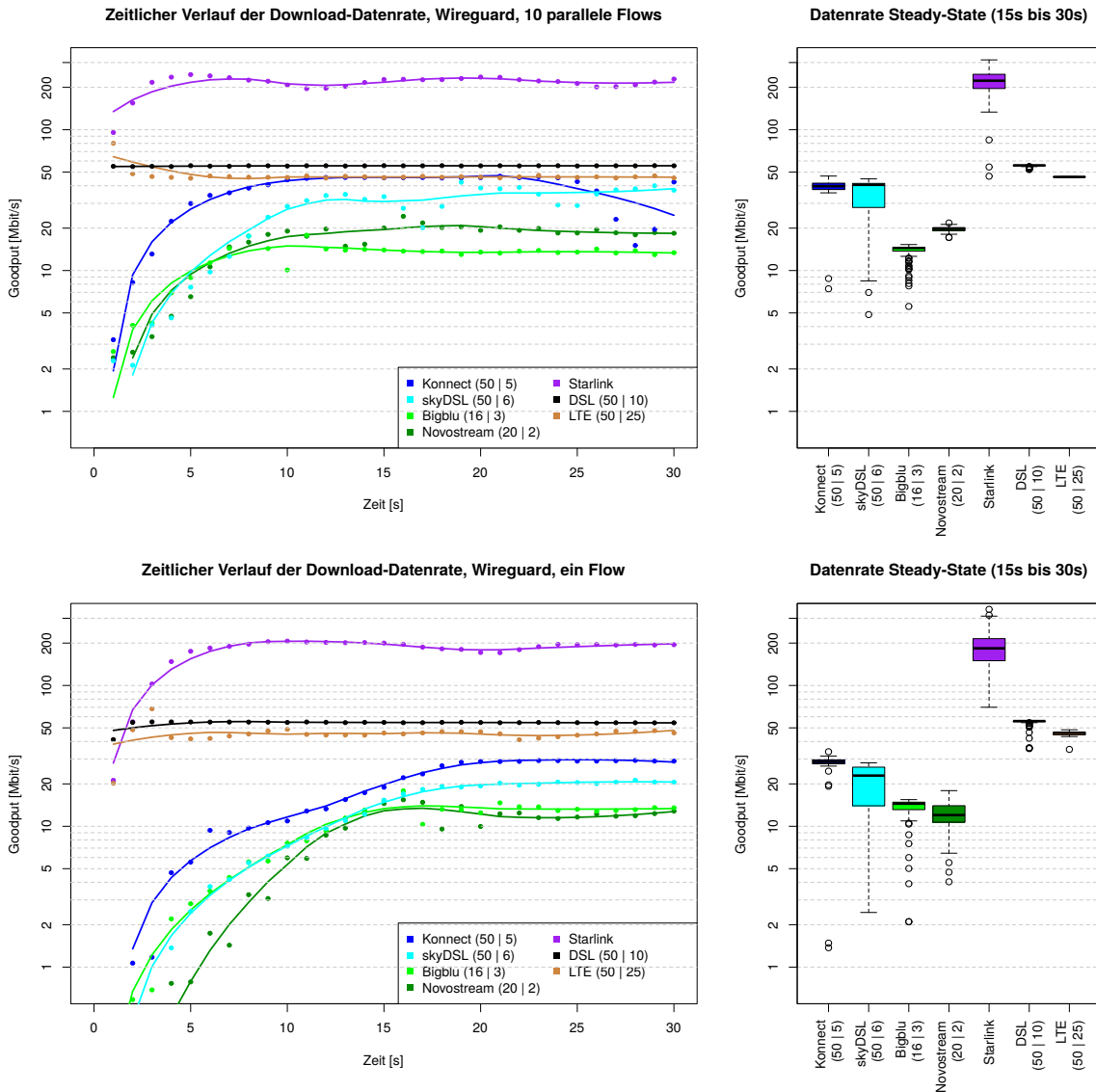


Ergebnisse:

- Geostationäre Satellitenverbindungen: Diese haben am Anfang geringe Datenraten, es dauert mehrere Sekunden, bis die Datenrate gesteigert wird; dies ist auf die bereits beschriebenen TCP-Mechanismen und die Nicht-Anwendbarkeit von PEPs zurückzuführen. Die erreichbare Datenrate bei Verwendung eines Flows ist geringer als die Linkkapazität, zudem gibt es große Schwankungen in der erreichten Datenrate (dies zeigt, dass durch die Verwendung von PEPs die Datenrate zuverlässiger zur Verfügung gestellt werden kann).
- Bei DSL führt die VPN-Software zu keiner Leistungsminderung, auch die Verwendung von einem oder mehreren Flows ist unerheblich. Bei allen anderen Technologien führt die Verwendung mehrerer Flows zu höheren Datenraten; Grund hierfür sind die bereits erwähnten TCP-Mechanismen. Besonders auffällig ist der Vorteil mehrerer Verbindungen bei Konnect.
- Starlink erreicht in Verbindung mit OpenVPN geringere Datenraten. Dies ist vor allem auf die Implementierung von OpenVPN zurückzuführen, welche bei höheren Datenraten als ineffizient gilt.

Download-Datenrate – Wireguard

Wireguard ist eine moderne VPN-Software, im Vergleich zu OpenVPN könnte diese insbesondere bei höheren Datenraten bessere Ergebnisse liefern.



Ergebnisse:

- Die erreichbaren Datenraten sind durchwegs größer als bei OpenVPN, insbesondere bei Konnect, skyDSL und Starlink.
- Das Problem der anfänglichen geringen Datenraten bei geostationären Satelliten besteht aber auch bei Wireguard. Im Vergleich zu OpenVPN gibt es bei Konnect mit einem Flow eine geringfügige Verbesserung und bei mehreren Flows eine signifikante Verbesserung.
- Beim Szenario mit parallelen Flows zeigt Konnect einen Einbruch bei ca. 30 s, anschließend werden auch wieder höhere Datenraten erreicht. Grund für derartige Fluktuationen könnte Traffic-Management im Betreiber Netzwerk oder TCP-Mechanismen sein.

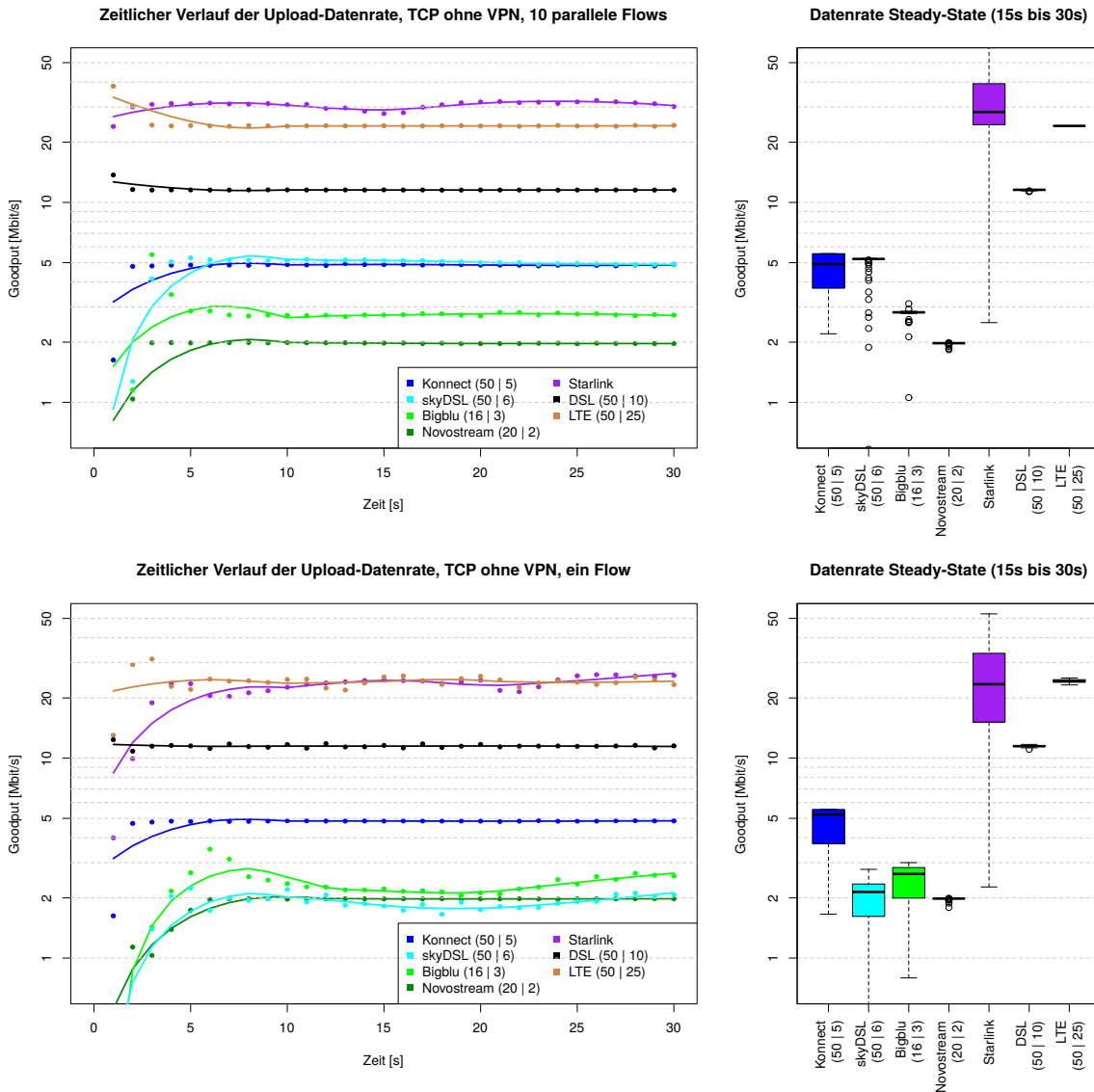
4.1.2 Upload-Datenrate

Im Upload fallen üblicherweise weniger Daten an als im Download, daher sind die Upload-Datenraten auch geringer als im Download (asymmetrische Kanäle). Für bestimmte Anwendungen (Videokonferenzen, Upload von Fotos oder Videos, Upload von Dateien im Homeoffice) ist aber auch die Upload-Datenrate wichtig.

Messaufbau wie zuvor. Bei `iperf3` wird der Parameter `--get-server-output` verwendet, hiermit werden die vom Client zum Server gesendeten Daten (Upload) ausgewertet.

Upload-Datenrate – TCP ohne VPN

Auch im Upload gilt, dass in geostationären Satellitennetzwerken TCP-Proxies eingesetzt werden.

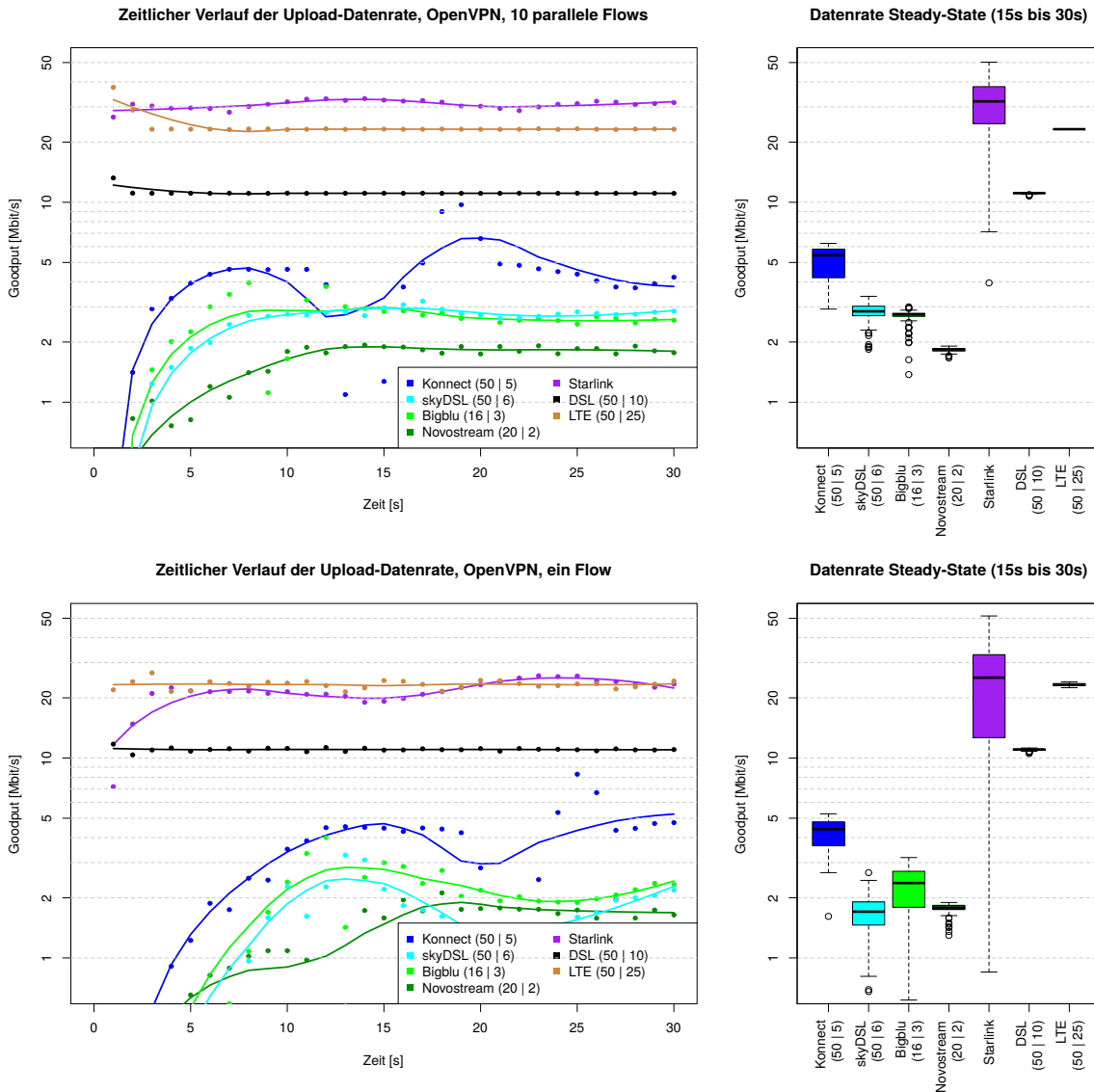


Ergebnisse:

- Die Datenraten der GEOs sind generell geringer als die der terrestrischen Anbieter bzw. Starlink. Die vereinbarten Datenraten werden eingehalten, lediglich skyDSL erreicht bei der Verwendung eines einzelnen Flows deutlich geringere Datenraten, der Grund hierfür ist nicht bekannt. Starlink hat, wie im Download, auch im Upload keine stabilen Datenraten.
- Die Satellitennetzwerke haben auch im Upload eine kurze Anlaufphase, in welcher geringere Datenraten erreicht werden, insbesondere wenn nur eine TCP-Verbindung verwendet wird. Da die Datenraten im Upload insgesamt geringer sind werden aber auch die nominellen Datenraten schnell erreicht.

Upload-Datenrate – OpenVPN

Auch im Upload gilt bei der Verwendung einer VPN-Software wie z. B. OpenVPN oder Wireguard, dass keine TCP-Proxies eingesetzt werden können.

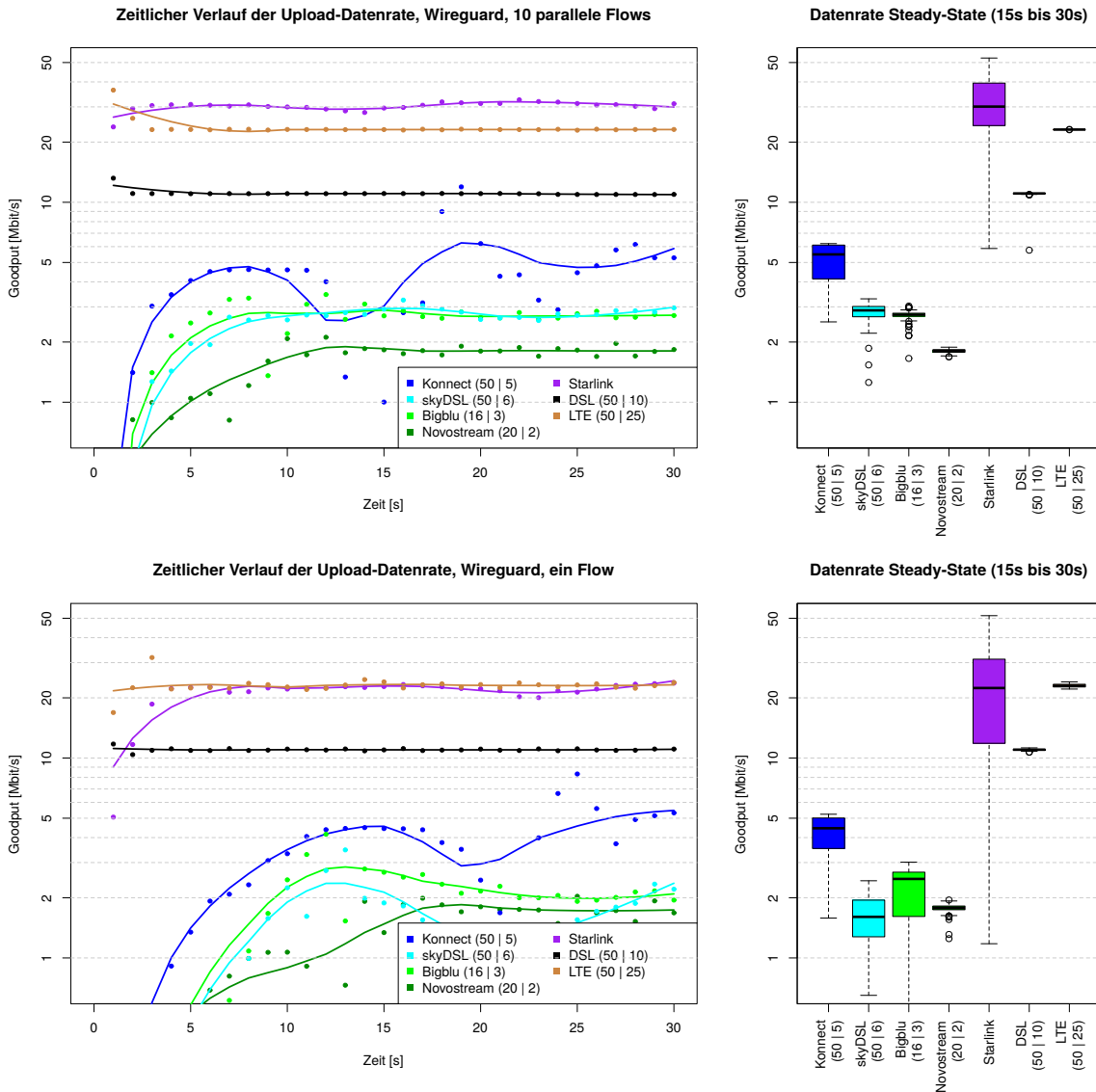


Ergebnisse:

- Der Unterschied zwischen einem und mehreren TCP-Verbindungen ist vorhanden, aufgrund der insgesamt geringeren Datenraten aber weniger ausgeprägt.
- Die Datenraten bei den geostationären Satelliten zeigen große Schwankungen, obwohl eine Vielzahl an Messungen durchgeführt wurde. Der Grund für diese Fluktuationen könnten das Traffic-Management des Betreibers oder TCP-Mechanismen sein.

Upload-Datenrate – Wireguard

Zuletzt wird Wireguard im Upload betrachtet. Da die Datenraten im Upload verhältnismäßig gering sind, werden keine großen Unterschiede im Vergleich zu OpenVPN erwartet.



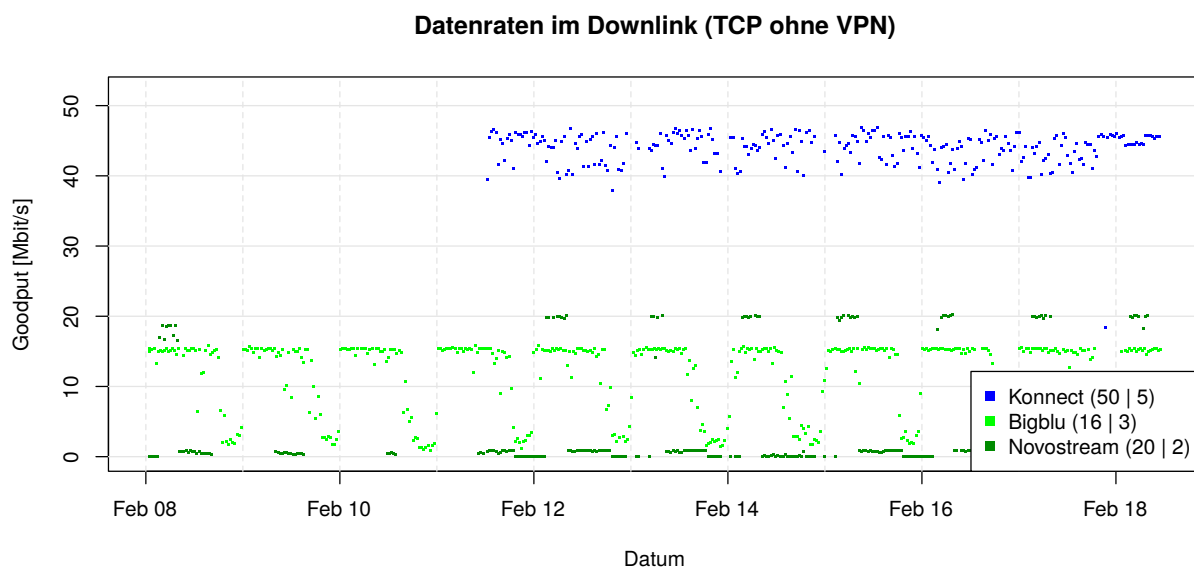
Ergebnisse:

- Wie erwartet sind die Ergebnisse ähnlich zu den OpenVPN Messungen. Die Verwendung von Wireguard bringt also keinen Vorteil im Upload (aber im Download).
- Auch hier ist der Unterschied zwischen einem und mehreren Flows gering.
- Erneut zeigen sich große Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Datenrate bei der Verwendung von geostationären Satelliten. Genau wie bei OpenVPN wäre hier eine tiefgehende Analyse der Protokollmechanismen notwendig.

4.1.3 Zeitliche Abhängigkeit der Datenrate, Wettereinflüsse

Messaufbau im Zeitraum vom 8. Februar 2021 bis 18. Februar 2021:

- Anfang Februar: Starker Schneefall
- Tool: `iperf` 2.0.10 mit Übertragungsdauer von 10s, eine TCP-Verbindung
- Client: Linux
- Server: Linux (DFN)
- ~500 Messungen je Betreiber, abzüglich fehlgeschlagener Messungen Anfang Februar
- Die Betreiber skyDSL und Starlink waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht Teil des Testaufbaus



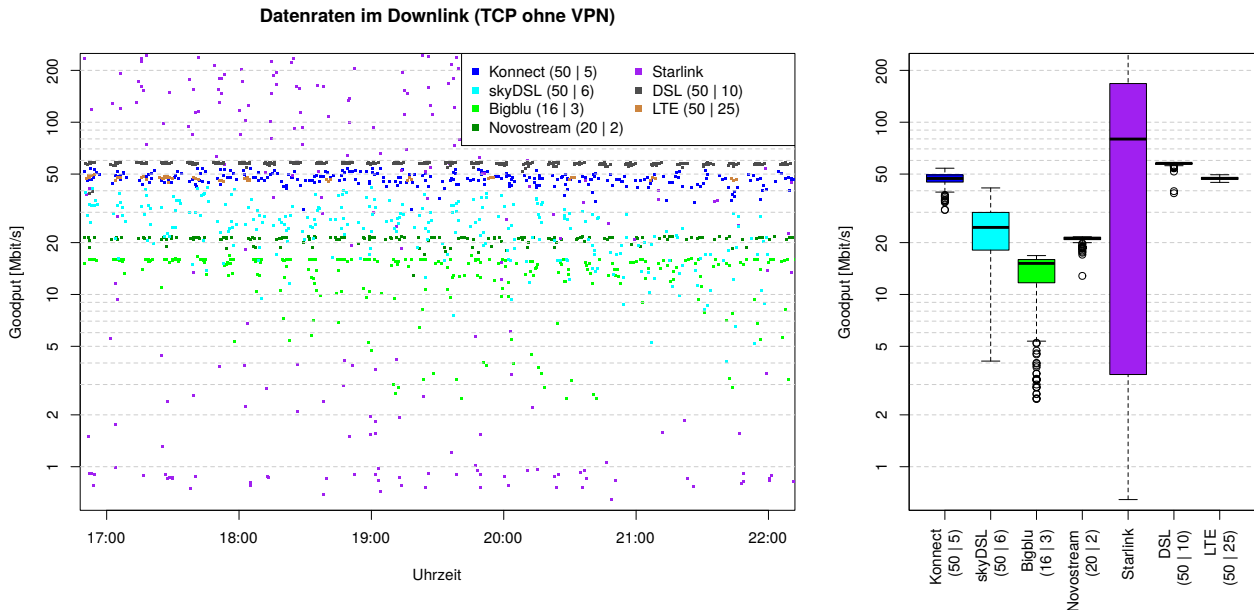
Ergebnisse:

- Bei Konnect/Eutelsat waren Anfang Februar keine Verbindungen möglich, wahrscheinlich bedingt durch starken Schneefall.
- Bei Novostream/Astra waren Anfang Februar häufig keine Verbindungen möglich, wahrscheinlich bedingt durch starken Schneefall.
- Novostream/Astra zeigt in diesen Messungen häufig sehr geringe Datenraten, was auf ein Fehlverhalten im Netzwerk des Betreibers bei bestimmten Ports/Protokollen zurückzuführen ist. Nach Rücksprache mit Novostream/Astra wurde dieses Problem mittlerweile behoben.
- Bigblu/Eutelsat hatte durchgängig eine erfolgreiche Verbindung, allerdings Einbrüche während der Abendstunden.

Weitere Messungen im Zeitraum vom 5. April bis 16. April 2021:

- Fokus auf Abendstunden von 17:00 Uhr bis 23:00 Uhr
- Tool: `iperf` 3.1.3 mit Übertragungsdauer von 30s, eine TCP-Verbindung
- Client: Linux
- Server: Linux (DFN, Azure, AWS)
- ~100 Messungen je Betreiber und Server

Da es in den Ergebnissen keine Unterschiede beim verwendeten Server gegeben hat, wurden die Ergebnisse für verschiedene Server zusammengefasst (ergibt ~ 300 Messungen je Betreiber).



Ergebnisse:

- Zeitliche Einbrüche bei Bigblu/Eutelsat deutlich geringer.
- Bei skyDSL sind zwischen 21:00 Uhr und 22:00 Uhr viele Messwerte kleiner 30 Mbit/s.
- Bitte beachten: Bis Mitte Mai wurden bei den Starlink-Messungen teilweise sehr geringe Datenraten (kleiner 1 Mbit/s) erreicht, wie in der Abbildung oben dargestellt. Neuere Messungen zeigen diese Einbrüche jedoch nicht mehr (siehe vorherige Bulk Data Transfer Messungen). Dies verdeutlicht, dass Computernetzwerke und -protokolle ständigen Veränderungen unterworfen sind und insbesondere, dass Starlink sich noch im Beta-Test befindet.

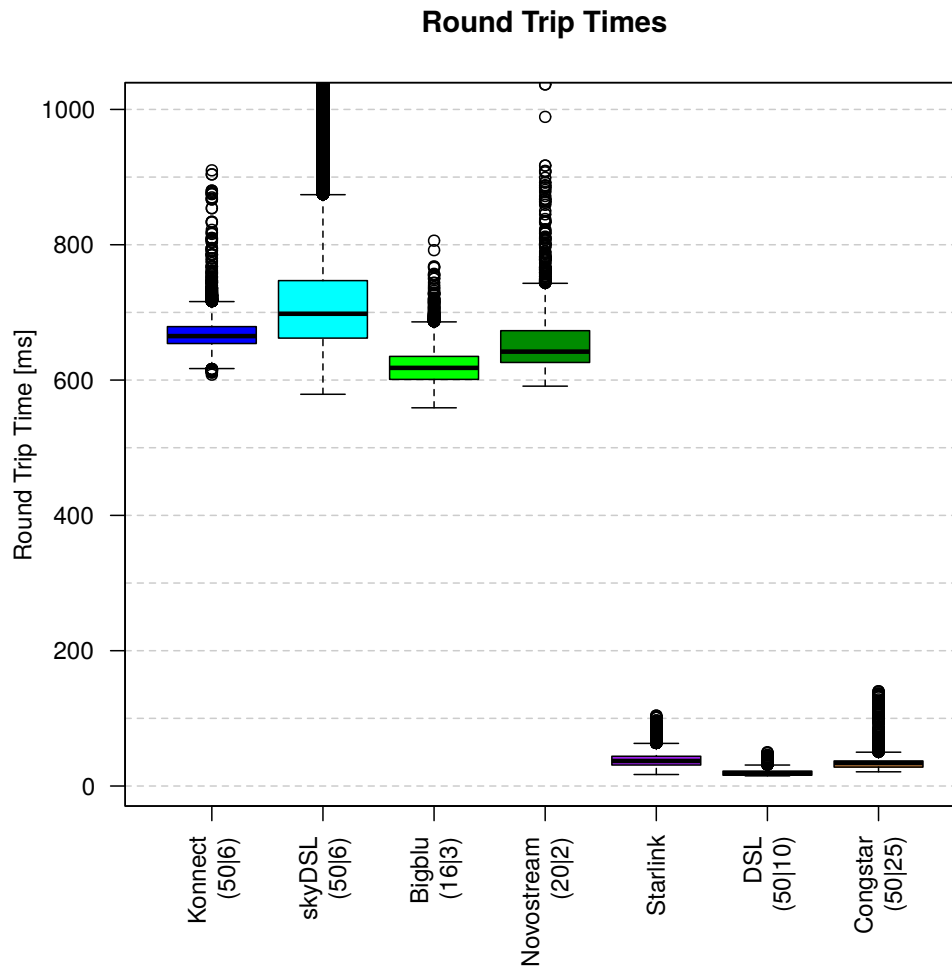
4.2 Latenz (Verzögerung, Round Trip Time)

Wie eingangs erläutert, unterscheidet sich die Latenz von geostationären Satellitenverbindungen sehr von anderen Zugangstechnologien. Die Umlaufzeit (engl. *Round Trip Time*) bezeichnet hierbei die Zeit, welche ein Paket benötigt um von Quelle zum Ziel und zurück gesendet zu werden.

Messaufbau:

- Tool: C/C++ UDP Client/Server Anwendung
<http://perform.wpi.edu/downloads/#udp>
- Client: Linux
- Server: Linux (DFN, Azure, AWS)
- UDP-Paketgröße: 56 / 1000 Byte
- Sendeintervalle:
100 ms (100000 Pakete), 1 s (10000 Pakete), 5 s (1000 Pakete)

Zusammengefasst dargestellt sind aus Gründen der Übersichtlichkeit die Ergebnisse für das Sendeintervall von 1 s mit allen Paketgrößen bzw. Servern. Paketgrößen und Server haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse mit einer Ausnahme: Für die Kombination aus dem Sendeintervall von 5 s und einer Paketgröße von 1000 Byte ergeben sich bei den Satellitennetzwerken von Eutelsat (Konnect, skyDSL und Bigblu) RTTs in der Größenordnung von ca. 1400 ms (entspricht zwei RTTs). Derartige Kombinationen, welche in der Praxis weniger relevant sind, sollten in zukünftigen Messungen genauer untersucht werden.



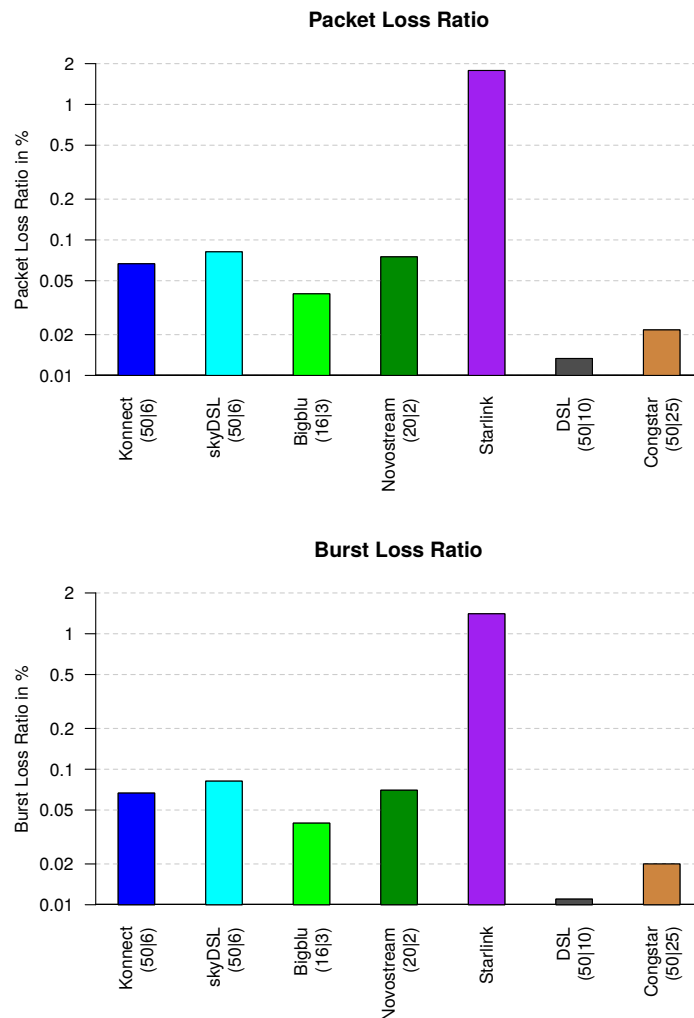
Ergebnisse:

- Charakteristisch für geostationäre Satellitensysteme sind hohe RTTs, der Median ist bei allen Systemen größer 600 ms. Die Performance unterschiedlicher Betreiber unterscheiden sich dabei ebenfalls.
- Die Varianz der Paketlaufzeit (engl. *Jitter*) ist bei den geostationären Satellitennetzwerken ebenfalls höher als bei den anderen Technologien. Grund hierfür könnten Kanalzugriffsmechanismen, Traffic-Management oder Backbone-Anbindung sein.
- Der Median bei Starlink und den terrestrischen Systemen DSL und LTE ist kleiner 50 ms, d. h. die RTTs von Starlink sind vergleichbar mit terrestrischen Internetzugängen.

4.3 Paketverluste

In paketvermittelten Netzwerken kann es stets zu Paketverlusten kommen, dies wird in Protokollen und/oder Anwendungen berücksichtigt. Es gibt unterschiedliche Gründe für Paketverluste (Störung des Übertragungskanal oder Überlast im Netzwerk), ohne Zugriff auf das Betreiber Netzwerk kann jedoch nicht ermittelt werden, aus welchem Grund bzw. auf welchen Verbindungsabschnitten Pakete verloren gehen. In den zwei folgenden Diagrammen sind Paket- bzw. Burstverluste gezeigt. Bei Burstverlusten gelten mehrere aufeinanderfolgende Paketverluste als ein Verlust-Ereignis.

Messaufbau und Auswertung wie in Abschnitt 4.2 Round Trip Times.



Ergebnisse:

- Paketverlustraten und Burstverlustraten sind ähnlich, daraus folgt, dass meist nur einzelne Pakete verloren gehen. Bei Starlink gehen manchmal zwei oder mehr Pakete hintereinander verloren, die Differenz zwischen Paketverlustrate (1,8 %) und Burstverlustrate (1,4 %) ist jedoch gering.
- Bei allen Internetzugängen außer Starlink ergeben sich geringe Verlustraten kleiner 0,1 %, dieser Wert kann als sehr gut beurteilt werden. Die minimal geringeren Verlustraten bei den terrestrischen Internetanschlüssen (vor allem DSL) im Vergleich zu den geostationären Satellitenverbindungen sind für praktische Anwendungen nicht relevant.
- Die Verlustraten bei Starlink sind größer 1 % aber noch immer in einem akzeptablen Bereich, für die meisten Anwendungen sollte dies ebenfalls unproblematisch sein (vergleiche hierzu die Messungen zur Sprachqualität von Telefonie in Abschnitt 4.8). Da sich das Starlink-Netzwerk noch im Aufbau befindet, sollten diese Messungen in Zukunft erneut durchgeführt werden.

4.4 Zugriff auf Netzlaufwerke – Windows File Sharing

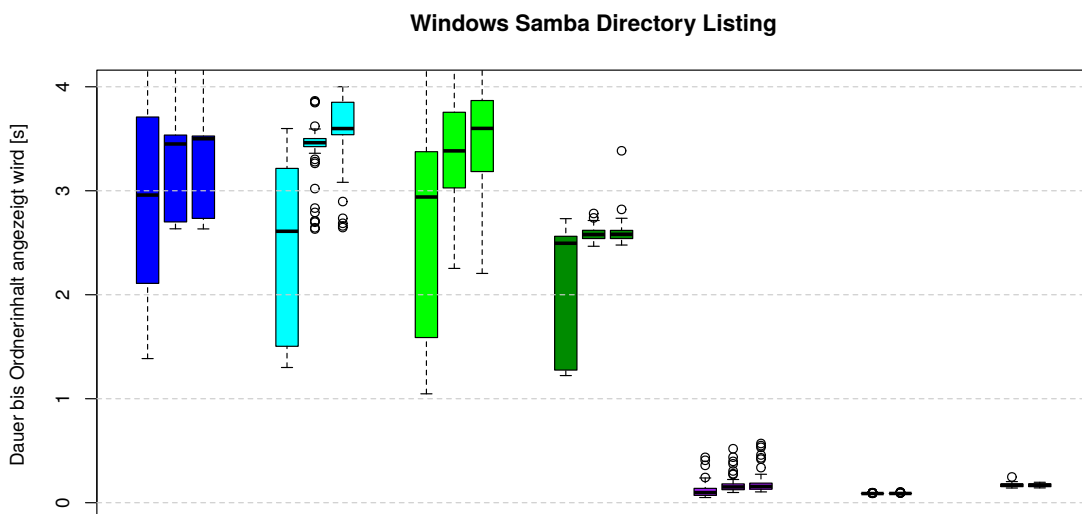
Der Zugriff auf Dateien über ein Netzwerklaufwerk ist ein gängiger Homeoffice-Anwendungsfall. Vom Homeoffice-PC wird eine verschlüsselte Verbindung in das Firmennetzwerk aufgebaut, sodass keine unbefugten Personen Daten mitlesen oder manipulieren können. Eine verschlüsselte Verbindung wird häufig über VPN-Software wie beispielsweise OpenVPN oder Wireguard aufgebaut, wodurch TCP-Proxies in geostationären Satellitennetzwerken nicht zur Anwendung kommen können. Es sei angemerkt, dass der sichere Zugriff auf Dateien und Daten im Firmennetzwerk technisch auch ohne VPN-Software realisiert werden könnte (z. B. über einen Web-Browser), dies erfordert jedoch entsprechende Software. Im Folgenden werden zwei typische Aktionen evaluiert: Das Anzeigen von Ordnerinhalten auf einem Netzwerklaufwerk sowie das Kopieren von Dateien.

Messaufbau allgemein:

- Tool: Windows PowerShell-Script
- Windows Samba-Dateifreigabe (SMB Protokoll mit dialect 3.1.1)
- Client: Windows
- Server: Windows (Azure)
- Keine Optimierung von Parametern
<https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/performance-tuning/role/file-server/>
- 100 Iterationen
- Üblicherweise werden Windows Freigaben aus Sicherheitsgründen nur in Verbindung mit VPNs verwendet, zur Demonstration wird in diesen Messungen aber auch der direkte Zugriff über TCP getestet. Bei DSL und LTE wird das SMB-Protokoll jedoch vom Betreibernetzwerk blockiert, daher ist ohne VPN kein Zugriff möglich.

4.4.1 Anzeigen von Ordnerinhalten

Diese Messungen betrachten das Navigieren in Ordnerstrukturen. Hierzu wird ein Ordner geöffnet, um dessen Inhalt anzuzeigen. Das Netzlaufwerk wurde vorab eingebunden. Abruf der Inhalte eines Ordners in 60 s Intervallen, um Caching zu vermeiden (bei mehrmaligen, direkt aufeinanderfolgenden Zugriffen auf das gleiche Verzeichnis wird der bereits bekannte Inhalt angezeigt).



Ergebnisse:

- Die hohe Latenz der geostationären Satelliten wirkt sich negativ auf das Navigieren in Verzeichnissen aus; es dauert Sekunden, bevor Inhalte angezeigt werden, während bei den anderen Zugangstechnologien Inhalte im Bruchteil einer Sekunde verfügbar sind.
- Der direkte Zugriff über TCP (ohne VPN, d. h. PEPs werden verwendet) stellt nur einen geringen Vorteil dar. Grund hierfür ist, dass PEPs bei TCP zwar schnell eine höhere Datenrate zur Verfügung stellen können, beim Anzeigen von Verzeichnisinhalten werden jedoch mehrere Nachrichten zwischen Client und Server ausgetauscht, was entsprechend viele Round Trip Times benötigt.

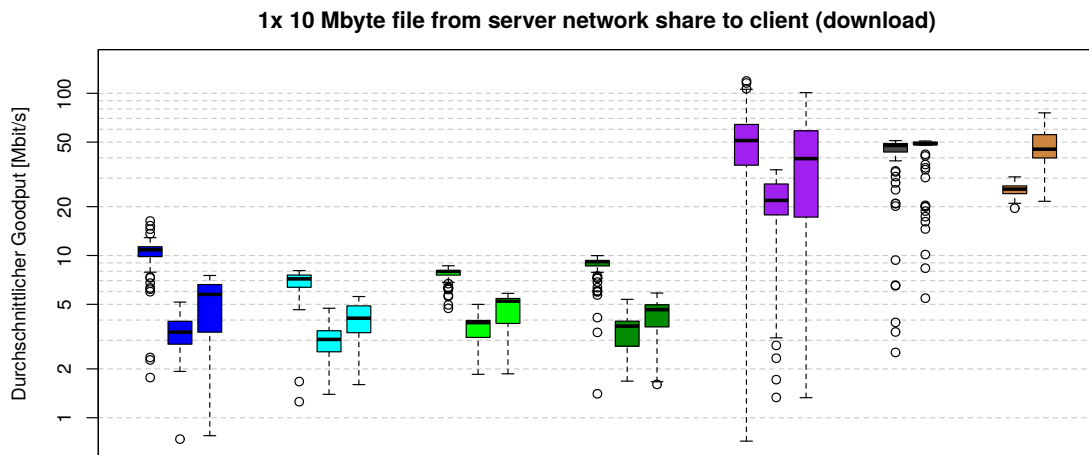
4.4.2 Download von Dateien

Das Kopieren von Dateien von Firmen-Netzlaufwerken ist ein weiterer typischer Anwendungsfall im Homeoffice. Im Folgenden wird eine große Datei (10 MByte) bzw. mehrere kleinere Dateien ($10 \cdot 1$ MByte) vom Server zum Client kopiert. Es wird hierbei die Zeit von der Initiierung des Kopiervorgangs bis zur Beendigung gemessen (Gesamtdauer). Zur besseren Vergleichbarkeit mit den vorherigen Messungen wird statt der Dauer des Kopiervorgangs die Datenrate angegeben (Durchschnittlicher Goodput):

$$\text{Durchschnittlicher Goodput} = 10 \text{ MByte} / \text{Gesamtdauer}$$

Kopieren einer 10 MByte-Datei

Dies dient zur Bewertung eines einfachen Kopiervorgangs einer großen Datei vom Server zum Client.

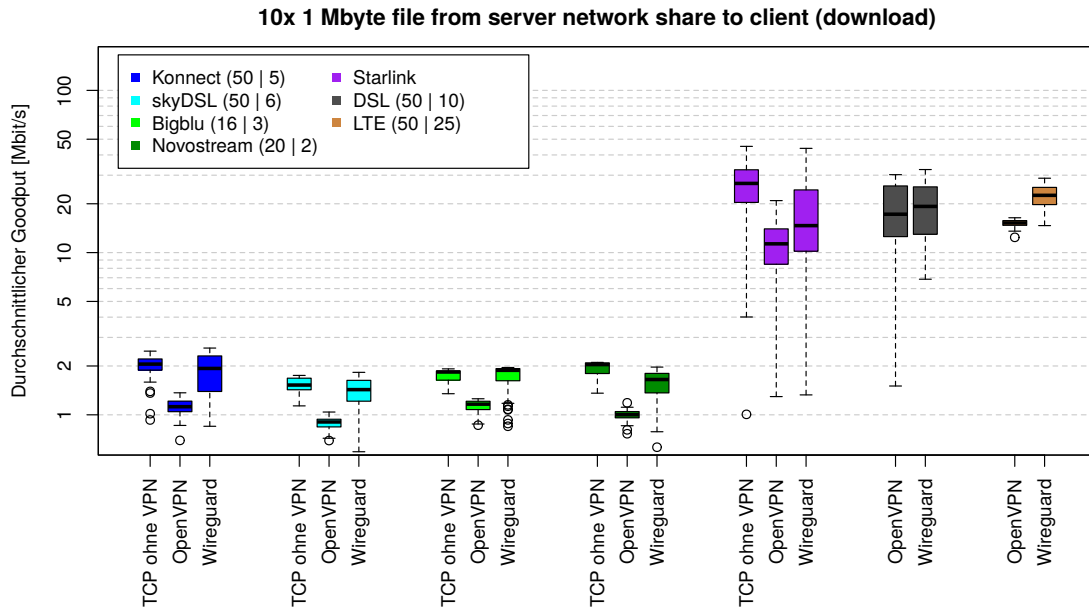


Ergebnisse:

- Im Vergleich zur maximalen Linkkapazität sind die erreichten Datenraten bei geostationären Satellitensystemen gering.
- Der Einsatz von PEPs ist vorteilhaft, dennoch werden nicht die Datenraten von Starlink oder terrestrischen Anschlüssen erreicht.
- Wireguard zeigt allgemein eine bessere Performance als OpenVPN, dies wurde bereits im Abschnitt 4.1 Bulk Data Transfer diskutiert.

Kopieren mehrerer Dateien (zehnmal 1 MByte)

Statt einer 10 MByte-Datei werden zehn 1 MByte-Dateien kopiert. Obwohl die Datenmenge gleich groß ist, ist zu erwarten, dass der Kopiervorgang im Vergleich zum vorherigen Fall langsamer wird. Dies liegt daran, dass die Dateien sequentiell kopiert werden und dadurch mehr Verzögerungen im Protokollablauf entstehen.



Ergebnisse:

- Wie erwartet, ist die Dauer des Kopiervorgang höher, d. h. die Datenrate (Goodput) geringer.
- Der Vorteil von PEPs bei geostationäre Satellitennetzwerken ist nun geringer, da jede Datei einzeln angefordert und übertragen wird.
- Erneut zeigt Wireguard eine bessere Performance als OpenVPN.

4.5 HTTP Datei-Download

Die Übertragung einer einzelnen Datei über HTTP (d. h. der Download einer Datei im Browser) ist vergleichbar mit den Bulk Data Transfer Messungen in Abschnitt 4.1.1.

Messaufbau:

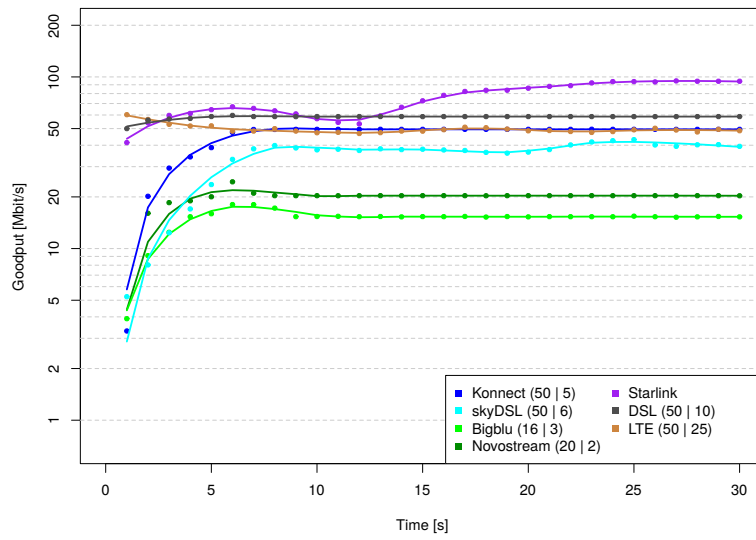
- Client: Windows curl 7.55.1
- Server: Linux (DFN) Apache/2.4.29 Ubuntu
- Verwendung von HTTP/1.1
- 10 Iterationen

Bei Starlink gab es Mitte Mai 2021 eine Optimierung im Netzwerk (vgl. Hinweis am Ende von Abschnitt 4.1.3), woraufhin höhere Datenraten erreicht wurden. Die im Folgenden gezeigten Messungen wurden vor dieser Optimierung durchgeführt. Daher sollten bezüglich der maximal erreichbaren Datenrate bei Starlink die Ergebnisse in Abschnitt 4.1 Bulk Data Transfer verwendet werden.

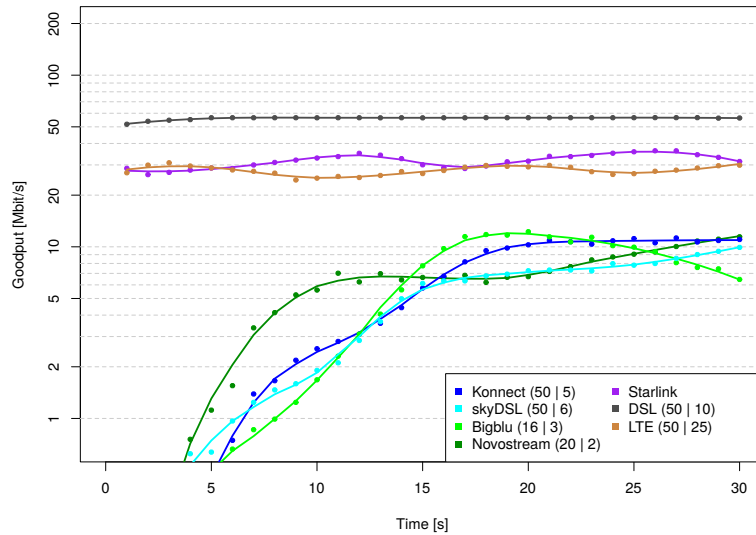
Wie zu erwarten, sind die Ergebnisse ähnlich zu den Messungen in Abschnitt 4.1.1:

- Beim Datei-Download über TCP ohne VPN profitieren geostationäre Satellitenverbindungen von TCP-Proxies.
- Bei der Verwendung von VPNs sind die Datenraten zu Beginn gering.
- Wireguard erreicht höhere Datenraten als OpenVPN.

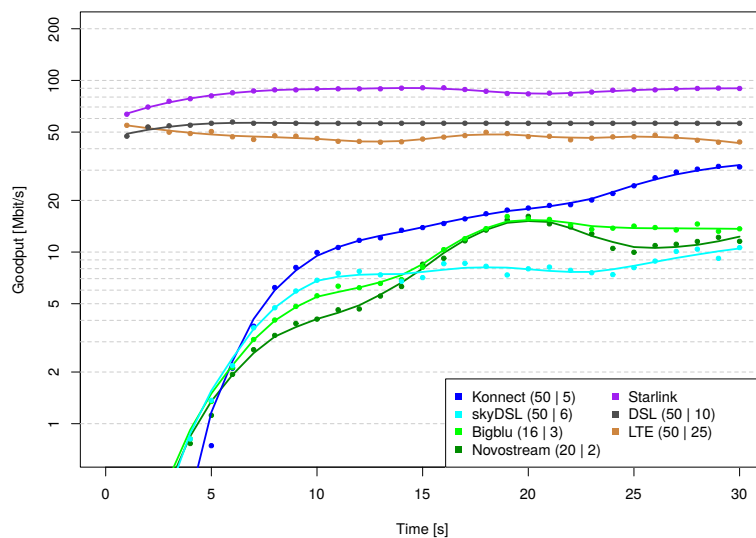
HTTP Datei-Download, zeitlicher Verlauf der Datenrate, TCP ohne VPN



HTTP Datei-Download, zeitlicher Verlauf der Datenrate, OpenVPN



HTTP Datei-Download, zeitlicher Verlauf der Datenrate, Wireguard



4.6 Videostreaming

Für hochauflösendes Videostreaming ist vor allem eine ausreichende Datenrate notwendig. In Google Youtube sind diverse Einstellungen verfügbar, und es gibt Empfehlungen bezüglich der notwendigen Datenrate im Downlink¹⁰. Leider wird bei den Empfehlungen keine Angabe für die Auflösung 2560x1440 gemacht, und auch die Framerate wird nicht berücksichtigt. Die Framerate beträgt üblicherweise 30 *Frames per Second* (fps), aber auch Videos mit 60 fps sind verfügbar, welche dann eine höhere Datenrate benötigen.

Auflösung Youtube-Videoplayer	Bezeichnung Google-Webseite	Empfehlung Datenrate Google-Webseite
640x360	SD 360p	0,7 Mbit/s
854x480	SD 480p	1,1 Mbit/s
1280x720	HD 720p	2,5 Mbit/s
1920x1080 HD	HD 1080p	5 Mbit/s
2560x1440 HD	keine Angabe	keine Angabe
3840x2160 4K	4K	20 Mbit/s

Basierend auf den Bulk Data Transfer Messungen (siehe Abschnitt 4.1.1) sollten grundsätzlich alle Technologien mindestens Videostreams in HD-Qualität oder besser abspielen können. Dies wurde exemplarisch mit einem Youtube-Video¹¹ mit 30 fps und unterschiedlichen Auflösungen getestet. Interessant sind hierbei die beim Abspielen von Youtube-Videos verfügbaren *Statistiken für Interessierte*, insbesondere der *Buffer Health*.

Anbieter	Auflösung	Bemerkungen
Konnect (50 5)	4K (3840x2160)	Häufiges Buffering, kein flüssiges Abspielen möglich. Laut Vertrag Limitierung der Datenrate für Videostreaming.
Konnect (50 5)	HD (2560x1440)	Kein Buffering.
skyDSL (50 6)	4K (3840x2160)	Sporadisches Buffering (meist wenn zeitlich Einbrüche in der Datenrate vorhanden sind, siehe Abschnitt 4.1.3).
skyDSL (50 6)	HD (2560x1440)	Kein Buffering.
Bigblu (16 3)	4K (3840x2160)	Häufiges Buffering, Downlink Datenrate nicht ausreichend.
Bigblu (16 3)	HD (2560x1440)	Kein Buffering.
Novostream (20 2)	4K (3840x2160)	Kein Buffering. Datenrate ist gerade noch ausreichend, der Abspiel-Buffer füllt sich langsam.
Starlink	4K (3840x2160)	Kein Buffering.
o2 DSL (50 10)	4K (3840x2160)	Kein Buffering.
Congstar LTE (50 25)	4K (3840x2160)	Kein Buffering.

4.7 Laden von Webseiten

Web-Browsing ist die Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungen (Informationsrecherche, Online-Einkäufe, soziale Netzwerke, etc.), daher ist die Ladezeit einer Webseite eine sehr bedeutende Metrik. Da beim Laden einer Webseite häufig mehrere TCP-Verbindungen aufgebaut werden und die Datenmengen nicht unerheblich sind, spielt sowohl die Latenz als auch die Datenrate eine Rolle. In [8] wird dies anschaulich dargestellt: Mit zunehmender Datenrate verringert sich die Ladezeit einer Webseite kaum, aber mit steigender Latenz erhöht sich die Ladezeit einer Webseite. Die in [9]

¹⁰Systemanforderungen - Youtube-Hilfe. <https://support.google.com/youtube/answer/78358>

¹¹Referenz-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=7ePaVv7TKGM>

durchgeführten Messungen zur Ladezeit von Webseiten über geostationäre Satellitenverbindungen bestätigen unsere Ergebnisse.

Das im Folgenden verwendete Browsertime-Framework stellt drei Metriken zur Verfügung:

- **First Contentful Paint (FCP)**: Dauer bis zu erstem sichtbaren Inhalt im Browser. Diese Metrik ist relevant, da sie signalisiert, dass die Seite geladen wird.
- **Visual Complete 85 (VC85)**: Dauer bis 85% der final sichtbaren Inhalte ohne zu scrollen (engl. above-the-fold) geladen wurden. Diese Metrik deckt sich mit der subjektiven Wahrnehmung, dass die Webseite nahezu vollständig geladen wurde und erste Inhalte konsumiert werden können.
- **Page Load Time (PLT)**: Zeit, bis alle in die Webseite eingebundenen Elemente geladen wurden inklusive Objekte, welche sich initial nicht sichtbar im unteren Bereich der Webseite befinden sowie nicht-sichtbare Objekte (z. B. Tracker zur Nachverfolgung des Nutzungsverhaltens).

Messaufbau:

- Client: **Browsertime 11.6.1** mit Default-Einstellungen (Google Chrome 91.0.4472.77)
Dieses Framework kann mittels Docker sowohl unter Linux als auch Windows ausgeführt werden, wobei die Windows-Standardinstallation von Docker WSL 2 (Windows Subsystem for Linux) verwendet. Ein Vergleich der Messungen zwischen Windows- und Linuxinstallation hat keine Unterschiede ergeben.
- Alexa Top 50 DE Webseiten
- 50 Iterationen (d. h. $50 \cdot 50 = 2500$ geladene Webseiten)
- Da bei Web-Browsing sowohl Datenrate als auch Latenz von Bedeutung sind, wurde die in Abschnitt 3.1 erwähnte Netem-Linkemulation genutzt, um die Datenrate des DSL-Anschlusses zu drosseln, ohne die Latenz zu verändern. Dadurch soll untersucht werden, wie sich die Ladezeit von Webseiten über terrestrische Internetanschlüsse mit geringer Datenrate verhält. Folgende zwei Kombinationen von Download- bzw. Upload-Linkkapazitäten wurden gewählt:
 - 6,0 Mbit/s (6016 kbit/s) im Download-Link und 0,5 Mbit/s (576 kbit/s) im Upload-Link
 - 1,0 Mbit/s (1024 kbit/s) im Download-Link und 0,1 Mbit/s (128 kbit/s) im Upload-Link (*DSL-Light* Internetzugang)

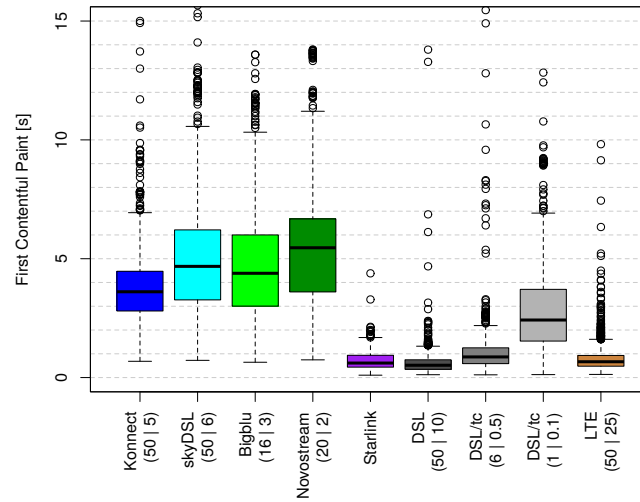
4.7.1 Initiales Laden von Webseiten

Das initiale Laden von Webseiten geschieht unter der Annahme, dass diese Webseite vorher nicht besucht wurde und sich daher keine Objekte im Cache des Browsers befinden. Dies kann als Worst-Case-Szenario betrachtet werden, da alle Elemente einer Webseite geladen werden müssen.

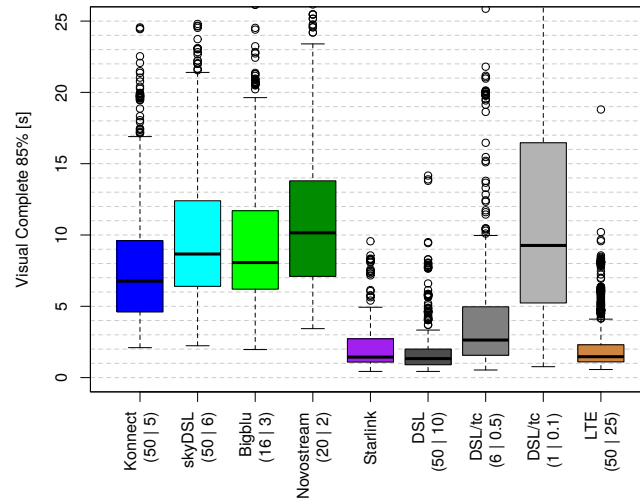
Ergebnisse:

- Wie zu erwarten gilt bei der Ladezeit: $FCP < VC85 < PLT$.
- Über eine geostationäre Satellitenverbindung ist die Ladezeit einer Webseite drei- bis viermal höher als über einen schnellen terrestrischen Kanal.
- Im Vergleich zu einem schnellen terrestrischen Kanal ergeben sich bei einem emulierten DSL-Kanal mit 6 Mbit/s im Downlink höhere Ladezeiten, diese sind aber meistens dennoch besser als die Verbindungen über geostationäre Satelliten. Bei einem emulierten DSL-Light-Kanal mit einer sehr geringen Datenrate von 1 Mbit/s im Downlink sind die Ladezeiten hingegen sehr hoch. Da im zeitlichen Verlauf mehr Datenmengen übertragen werden, ist dies besonders sichtbar bei den Metriken VC85 und PLT.
- Die Ladezeiten über geostationäre Satellitenverbindungen unterscheiden sich geringfügig, die Ursache hierfür wurde nicht ermittelt. Die Datenraten der verschiedenen geostationären Satellitenzugänge haben einen verhältnismäßig geringen Einfluss: Wie oben erwähnt (vgl. [8]), wird ab einer ausreichend großen Datenrate die Ladezeit einer Webseite hauptsächlich von der Latenz bestimmt.
- Starlink erreicht ähnliche Ladezeiten wie schnelle terrestrische Internetanschlüsse.

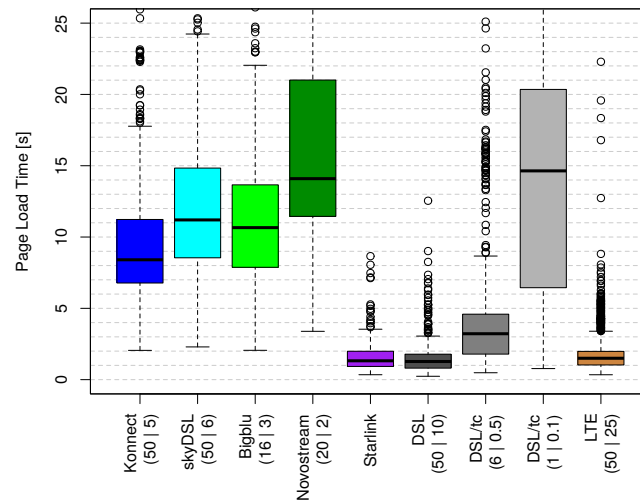
Alexa Top 50 DE Websites - Initiales Laden



Alexa Top 50 DE Websites - Initiales Laden



Alexa Top 50 DE Websites - Initiales Laden



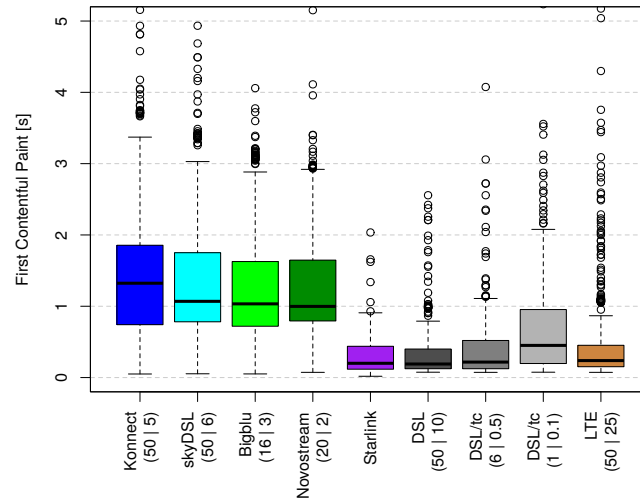
4.7.2 Erneutes Laden von Webseiten mit Adblocker

Häufig werden die gleichen Webseiten wiederholt besucht, sodass durch Caching eine geringere Ladezeit möglich ist. Es ist schwierig, die zeitliche Veränderung einer Webseite bzw. die Häufigkeit der Abrufe zu spezifizieren. Daher wird im Folgenden der idealisierte Fall untersucht, dass eine Webseite zweimal direkt hintereinander geladen wird und die Zeiten des zweiten Ladevorgangs ausgewertet werden. Im Browsertime-Framework wird dies mittels des `--preURL` Parameters erreicht. Zudem wird ein Adblocker (`Pi-hole v5.2.4`) verwendet, um die Anzahl der zu ladenden Objekte zu verringern.

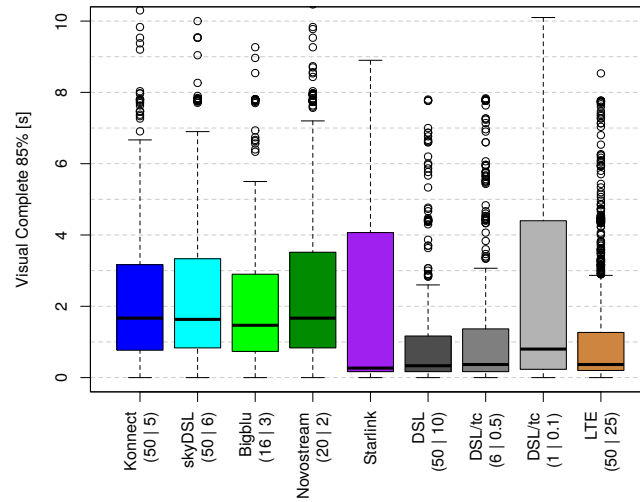
Ergebnisse:

- Im Vergleich zum initialen Laden von Webseiten sind die Ladezeiten wie erwartet geringer.
- Die Ladezeit von Webseiten ist bei den geostationären Satellitenverbindungen ähnlich und in allen Fällen größer als bei schnellen terrestrischen Anschlüssen oder Starlink.
- In wenigen Fällen sind alle Objekte der Webseite im Cache, sodass die Webseite nicht neu geladen und die Ladezeit einen Wert von nahezu 0 s ergibt.

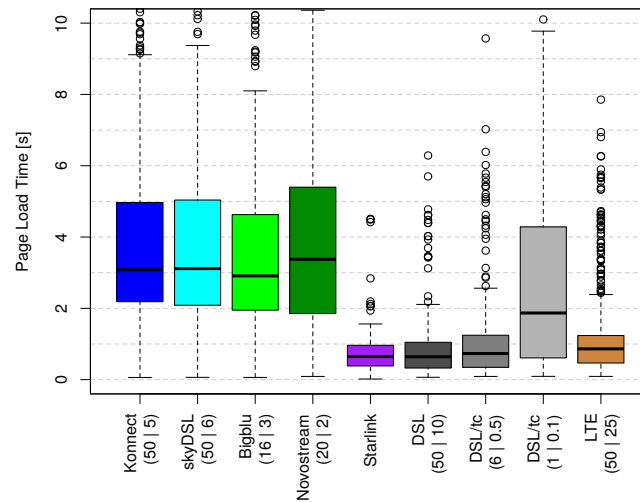
Alexa Top 50 DE Websites - Erneutes Laden mit Adblocker



Alexa Top 50 DE Websites - Erneutes Laden mit Adblocker



Alexa Top 50 DE Websites - Erneutes Laden mit Adblocker



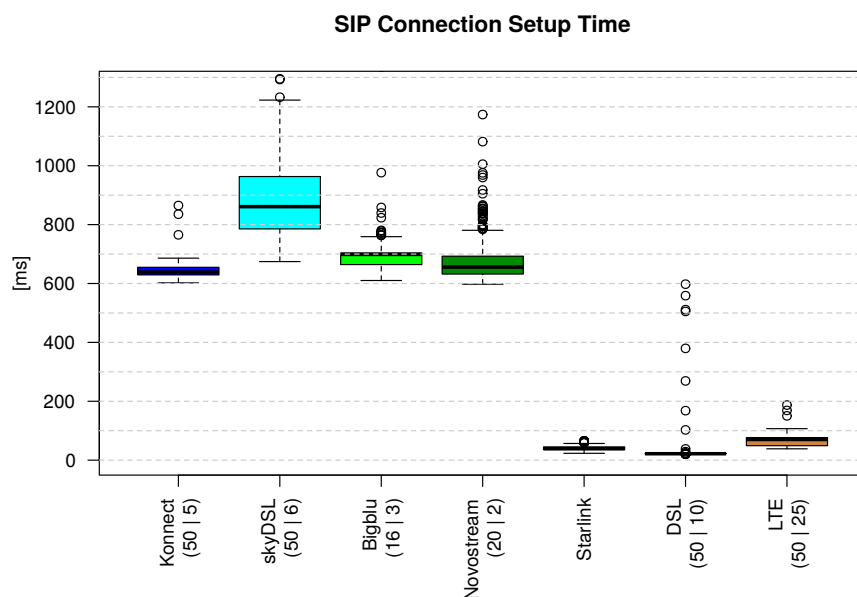
4.8 Telefonie – Voice over IP (VoIP)

Voice over IP Telefonie ist mit allen Zugangstechnologien möglich, da diese auf dem Internetprotokoll (IP) basieren.

Messaufbau für folgende Abschnitte:

- SIP¹² für SIP-Verbindungsaufbau (1 Call pro 5 Sekunden) und Übertragung von RTP-Daten.
- Client: Linux
- Server: Linux (DFN)
- 100 Iterationen

4.8.1 Dauer Verbindungsaufbau



Ergebnis:

Die Dauer eines Verbindungsaufbaus ist vergleichbar mit den Messungen in Abschnitt 4.2 Round Trip Times. Die Latenz der geostationären Satellitenverbindung wird deutlich, dürfte aber für viele Anwender/-innen unerheblich sein.

4.8.2 Sprachqualität – Mean Opinion Score (MOS)

Eine Bewertung der Mean Opinion Score (MOS) exemplarisch mit Hilfe des Tools **ViSQOL**¹³ versucht, welches gesendete und empfangene Audiodateien vergleicht. Eine Referenz-Audiodatei¹⁴ wird mittels SIPp und RTP übertragen und beim Empfänger aufgezeichnet. Ursprüngliche und empfangene Datei wird dann mittels **ViSQOL** verglichen. Es gilt zu beachten, dass SIPp den ITU-T G.711 Codec verwendet, während **ViSQOL** 16-bit PCM Audiodateien erwartet. Die Referenz-Audiodatei wird daher in beiden Formaten benötigt, und nach der Übertragung wird die Empfangsdatei von G.711 zu PCM konvertiert. Der Einfluss dieser Konvertierung wurde nicht im Detail untersucht, da die ermittelten MOS-Werte bereits sehr gut waren:

- Die MOS hat eine Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut).
- Bei keinen Paketverlusten beträgt die MOS in allen Messungen 4,732.

¹²<http://sipp.sourceforge.net/>

¹³<https://github.com/google/visqol>

¹⁴<https://www.nch.com.au/acm/8kulaw.wav>

- Bei Paketverlusten von ca. 1% beträgt die MOS zwischen 4,696 und 4,719.

Mit den in Abschnitt 4.3 ermittelten Paketverlusten ist daher eine sehr gute Sprachqualität erreichbar. Allerdings werden bei diesen Messungen keine Verzögerungen berücksichtigt, welche bei Nutzung von Telefonie ebenfalls relevant ist. Laut ITU-T Recommendation G.114 [10] werden bei Einweg-Verzögerungen zwischen 300 ms und 400 ms manche Benutzer/-innen unzufrieden sein („some users dissatisfied“).

5 Zusammenfassung

In diesem Dokument wurden verschiedene Anwendungen über verschiedene Breitbandinternetzugangsdienste evaluiert. Funktional gesehen eignen sich alle Technologien für die im EECC-Dokument bzw. den BEREC-Guidelines genannten Anwendungen.

Terrestrische Internetzugangstechnologien mit hohen Datenraten sind aufgrund des Preis-Leistungs-Verhältnisses im Normalfall die erste Wahl. Vor allem Glasfaseranschlüsse sind aus technischer Sicht konkurrenzlos. Jedoch gibt es Regionen, in denen keine terrestrischen Internetzugänge mit ausreichend hohen Datenraten verfügbar sind. Alleinstellungsmerkmal beim Internetzugang über Satellit ist, dass dieser eine flächendeckende Abdeckung bietet und daher allorts verfügbar ist. Es sind dabei zwei Systeme zu unterscheiden:

- Geostationäre Satellitennetzwerke
Diese können für eine Vielzahl von Anwendungen uneingeschränkt (Datei-Download, Videostreaming) oder mit geringen Einschränkungen (Web-Browsing, Telefonie) genutzt werden. Bei der Verwendung gängiger VPN-Lösungen und/oder latenzkritischer Anwendungen (diverse Online-Multiplayer-Spiele) werden jedoch Defizite erkennbar. Letztendlich ist die Notwendigkeit und Häufigkeit der Nutzung dieser Anwendungen sowie die persönliche subjektive Wahrnehmung ausschlaggebend für die Zufriedenheit bei der Nutzung eines solchen Systems.
- Megakonstellationen in niedrigen Umlaufbahnen
Das neue Starlink-Satellitennetzwerk zeigt in ersten Messungen hohe Datenraten und geringe Latenzen und ist mit leistungsfähigen terrestrischen Internetzugängen vergleichbar. Da sich das Netzwerk aktuell noch im Beta-Test befindet, muss jedoch evaluiert werden, welche Performance langfristig bzw. bei mehreren Nutzern erreicht wird. Zu berücksichtigen sind zudem die aktuell hohen Kosten.

Zusammengefasst können Internetzugänge über Satellit eine hohe Leistung erreichen und empfohlen werden. Je nach Nutzungsprofil muss entschieden werden, ob die Nachteile der hohen Latenz bei Internetzugängen über geostationäre Satelliten problematisch sind oder toleriert werden können. Den Nachteil der hohen Latenz haben Megakonstellationen nicht, sie sind sehr leistungsfähig, aber aktuell noch im Aufbau.

6 Literatur

- [1] S. Krempel, “TKG-Novelle: Bundestag beschließt schnelles Internet für alle.” Heise Online, Apr. 2021. <https://www.heise.de/news/TKG-Novelle-Bundestag-beschliesst-schnelles-Internet-fuer-alle-6024446.html>.
- [2] “Directive (EU) 2018/1972 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 establishing the European Electronic Communications Code,” Dec. 2018. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/1972/oj>.
- [3] Body of European Regulators for Electronic Communications, “BEREC Guidelines detailing Quality of Service Parameters.” BoR (20) 53, Mar. 2020. https://berec.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/berec/regulatory_best_practices/guidelines/9043-berec-guidelines-detailing-quality-of-service-parameters.
- [4] H.-M. Adler, P. Eitner, K. Ullmann, H. Waibel, and M. Wilhelm, “X-WiN: The Network Infrastructure of DFN.” https://www.dfn.de/fileadmin/1Dienstleistungen/XWIN/X-WiN-Broschuere_englisch.pdf.
- [5] J. Deutschmann, K.-S. Hielscher, and R. German, “Satellite Internet Performance Measurements,” in *2019 International Conference on Networked Systems (NetSys)*, IEEE, Mar. 2019.
- [6] J. Border, M. Kojo, J. Griner, G. Montenegro, and Z. D. Shelby, “Performance Enhancing Proxies Intended to Mitigate Link-Related Degradations.” RFC 3135, June 2001.
- [7] S. Claypool, J. Chung, and M. Claypool, “Comparison of TCP Congestion Control Performance over a Satellite Network,” in *Passive and Active Measurement*, pp. 499–512, Springer International Publishing, 2021.
- [8] I. Grigorik, *High Performance Browser Networking*. O’Reilly Media, Inc, USA, Sept. 2013. <https://hpbn.co/primer-on-web-performance/#more-bandwidth-doesnt-matter-much>.
- [9] R. Secchi, A. C. Mohideen, and G. Fairhurst, “Performance analysis of next generation web access via satellite,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 36, pp. 29–43, Dec. 2016.
- [10] International Telecommunication Union, “ITU-T G.114 (05/2003) One-way transmission time.” Series G: Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks, May 2003.