

Nachhaltigkeitsvergleich Internet- Zugangnetz-Technologien

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

3 März 2022

Verfasst von: Prof. Dr.-Ing. Kristof Obermann

Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangnetz-Technologien

Inhalt

EXECUTIVE SUMMARY	2
PROJEKTZIEL.....	4
HINTERGRUND UND UMFANG DER UNTERSUCHUNG	4
BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN	6
NACHHALTIGKEIT VON INTERNET-ZUGANGSNETZ-TECHNOLOGIEN	8
VERGLEICH LEISTUNGS-AUFNAHME UND GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK.....	10
VERGLEICH LEISTUNGS-AUFNAHME	11
VERGLEICH GEWICHT	13
DEUTSCHLANDWEITE PLANUNG	14
STÄDTISCHE GEBIETE.....	20
LÄNDLICHE GEBIETE	24
BEISPIEL FÜR HALBSTÄDTISCHE GEBIETE: HALTERN AM SEE	28
FAZIT.....	31
REFERENZEN	33
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	34

Haftungsausschluss

Die in dieser Publikation veröffentlichten Informationen spiegeln die Meinung des Autors wieder 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

Ziel des Gutachtens ist eine Untersuchung der Nachhaltigkeit der Internet-Zugangnetz-Technologien FTTH – Fiber to the home (in den Varianten GPON, XGS-PON und Punkt-zu-Punkt), FTTB - Fiber to the building (in der Variante G.fast), HFC-Kabelnetze (in der Variante DOCSIS 3.1) sowie FTTC (in den Varianten VDSL2 Vectoring und Super Vectoring).

Zur Ermittlung des Stromverbrauchs der unterschiedlichen Zugangs-Technologien wurde die Leistungsaufnahme und das Gewicht für die Systemtechnik für die folgenden Szenarien: deutschlandweite Versorgung, städtische Gebiete, ländliche Gebiete und exemplarisch für halbstädtische Gebiete Haltern am See mit realen Daten der dort bestehenden Telekommunikationsnetze untersucht. Das Gewicht kann zumindest als Indikator genommen werden, um erste Aussagen über die benötigten Ressourcen für die Herstellung und Entsorgung zu bekommen. Die Kenngrößen Leistungsaufnahme und Gewicht wurden für verschiedene Auslastungsgrade (homes connected - Anteil der angeschlossenen Haushalte in Prozent) sowohl bezogen auf den Gesamtstromverbrauch als auch auf die vermarktete Bitrate der jeweiligen Technologie dargestellt.

Im Ergebnis wurde festgestellt: FTTH ist sowohl bezogen auf den Gesamtstromverbrauch als auch auf eine vermarktete Übertragungsgeschwindigkeit (Bitrate) von 1 Gigabit / pro Sekunde die energieeffizienteste und damit nachhaltigste Technologie für die Datenübertragung im Internet.

Bezogen auf den Gesamtstromverbrauch (Leistung in Megawatt) der unterschiedlichen Zugangstechnologien (Abbildung 1) benötigen FTTH-Netze bis zu 2,6 Mal weniger Strom als FTTB-Netze. Im Vergleich zu FTTC-Netzen ist der Stromverbrauch bei FTTH-Netzen bis zu 3 Mal geringer. Am deutlichsten fällt der Unterschied zwischen FTTH- und HFC-Kabelnetzen aus. FTTH-Netze verbrauchen bis zu 6 Mal weniger Strom als HFC-Kabelnetze (DOCSIS 3.1).

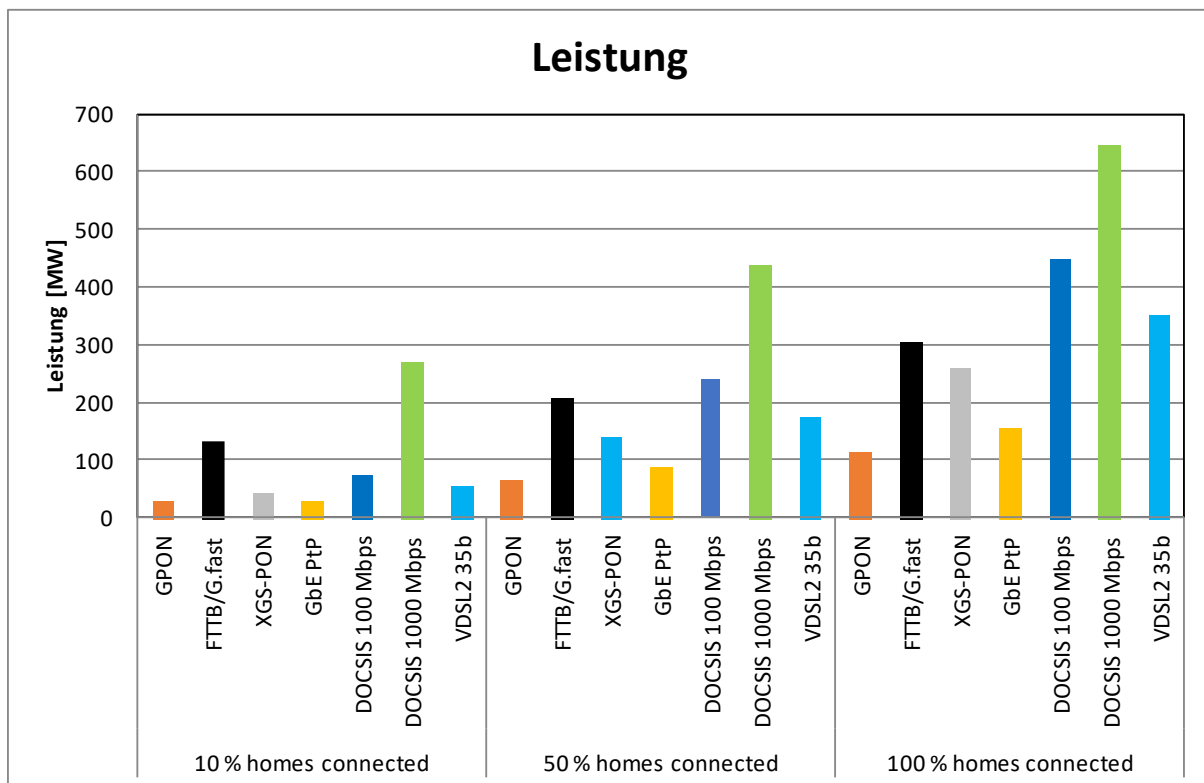


ABBILDUNG 1: GESAMTSTROMVERBRAUCH (LEISTUNG IN MEGAWATT) DER ZUGANGSTECHNOLOGIEN BEZOGEN AUF EINE DEUTSCHLANDWEITE VERSORGUNG UND VERSCHIEDENE ANSCHLUSSGRADE (HOMES CONNECTED = ANTEIL DER ANGESCHLOSSENEN HAUSHALTE IN PROZENT).

Bei Betrachtung des Gesamtstromverbrauchs (Leistung in Megawatt) der gigabitfähigen Zugangstechnologien (FTTH, FTTB, HFC-Kabelnetze) bezogen auf eine Übertragungsgeschwindigkeit von 1 Gigabit/pro Sekunde (Abbildung 2), verbrauchen FTTH-Netze im laufenden Betrieb bis zu 3,6 Mal weniger Strom als FTTB-Netze und fast 8 Mal weniger Strom als HFC-Kabelnetze (DOCSIS 3.1)

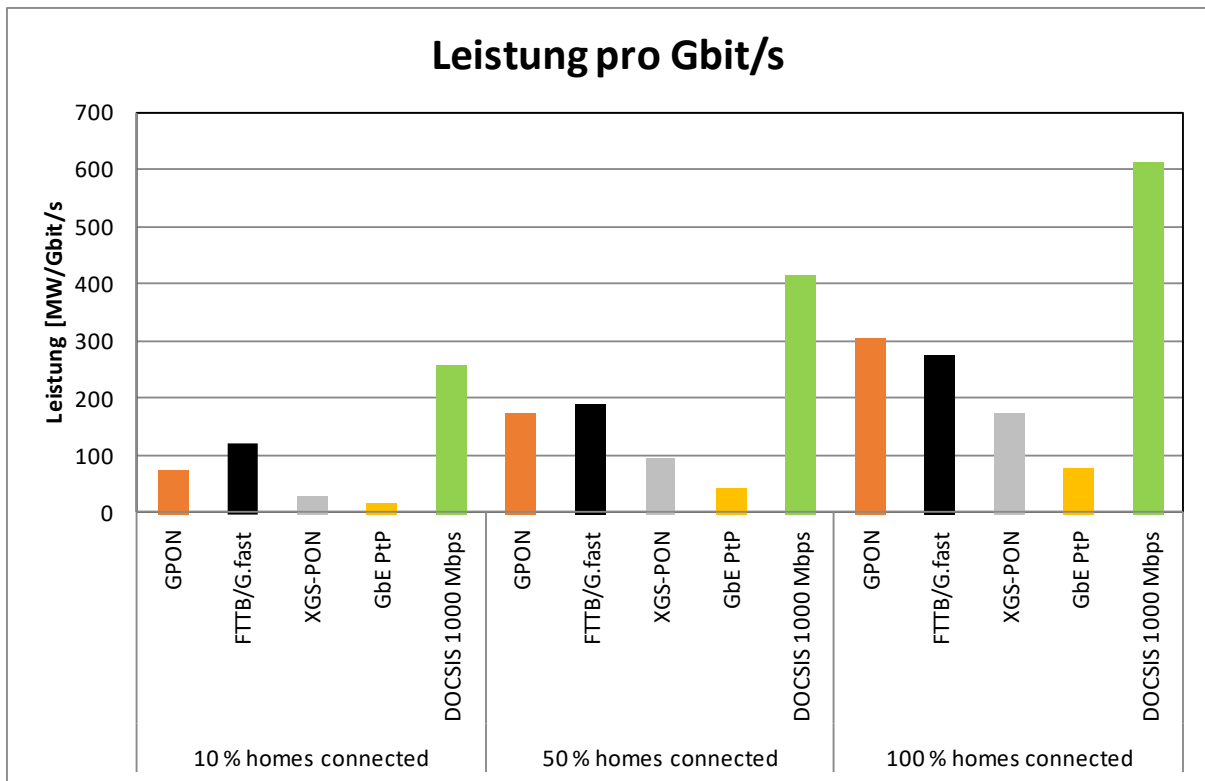


ABBILDUNG 2: GESAMTSTROMVERBRAUCH (LEISTUNG IN MEGAWATT PRO GIGABIT / PRO SEKUNDE) DER GIGABITFÄHIGEN ZUGANGSTECHNOLOGIEN BEZOGEN AUF EINE ÜBERTRAGUNGSGESCHWINDIGKEIT (BITRATE) VON 1 GIGABIT/PRO SEKUNDE BEI EINER DEUTSCHLANDWEITE VERSORGUNG UND FÜR VERSCHIEDENE ANSCHLUSSGRADE (HOMES CONNECTED – ANZAHL DER ANGESCHLOSSENEN HAUSHALTE)

Darüber hinaus bieten Glasfasernetze noch weiteres Einsparpotential: Versetzt man Komponenten wie Router häufiger in einen Sleep Modus, eine Art Standby, lässt sich noch mehr Strom und damit CO2 einsparen. Expert:innen gehen hier von einem weiteren Einsparpotential von bis zu 40 % bei den Haushalten aus.

Zusammenfassung: FTTH Zugangstechnologien sind in jedem Szenario und für fast jeden Anschlussgrad energieeffizienter als FTTB, FTTC und HFC-Kabelnetze. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Glasfaserausbaus (FTTH) als nachhaltige Grundlage für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft. Die Bundesregierung sollte daher Rahmenbedingungen schaffen, die zu einer weiteren Beschleunigung des Glasfaserausbaus beitragen, um Deutschland möglichst schnell mit nachhaltigen und zukunftssicheren Glasfasernetzen auszustatten. Durch die verstärkte Nutzung von Glasfasernetzen lässt sich der Energieverbrauch der digitalen Infrastruktur deutlich verringern.

Projektziel

Ziel des Gutachtens ist eine Erweiterung des bestehenden Gutachtens „Nachhaltigkeitsvergleich der Zugangstechnologien FTTC und FTTH“ [18] um die Zugangsvarianten DOCSIS3.1 und FTTB/G.fast. Dies impliziert eine vergleichende Darstellung der Leistungsaufnahme im laufenden Betrieb der Zugangstechnologien. Darüber hinaus soll ein Vergleich der benötigten Netzelemente (Gewicht) erfolgen, um erste Aussagen über die benötigten Ressourcen für die Herstellung und Entsorgung der Netzelemente zu bekommen. Die ermittelten Größen werden für verschiedene Auslastungsgrade der Zugangsnetze (Anteil homes connected) sowohl auf die Anzahl der Teilnehmeranschlüsse als auch auf die realisierbaren Datenraten bezogen. Bei der Untersuchung wird ausschließlich die aktive Infrastruktur (Netzelemente inkl. CPE) im Zugangsnetz berücksichtigt. Die passive Infrastruktur (z.B. Glasfaser, Kupferkabel, Koaxialkabel, Leerrohre) wird als vorhanden vorausgesetzt.

Hintergrund und Umfang der Untersuchung

„Unter Nachhaltigkeit verstehen wir eine Entwicklung, die ökologisch verträglich, sozial gerecht und wirtschaftlich leistungsfähig ist.“ [2]. In Bezug auf Produkte und Technologien ist hierbei grundsätzlich die Herstellung, die Installation, der Betrieb sowie die Entsorgung zu berücksichtigen.

Es gibt verschiedene Arten von Zugangsnetzen:

1. Glasfaser-basierte Zugangsnetze (Varianten GPON und Punkt-zu-Punkt):
 - a. FTTB inkl. G.fast
 - b. FTTH
2. Kupferdoppelader-basierte Zugangsnetze
 - a. ADSL (FTTEx)
 - b. VDSL2 17a / 35b (FTTC)¹
3. TV Kabelnetz-basierte Zugangsnetze (HFC)
 - a. DOCSIS3.0
 - b. DOCSIS3.1
4. Funk-basierte Zugangsnetze
 - a. 4G/5G Mobilfunk
 - b. 4G/5G FWA

In diesem Gutachten werden die Technologien FTTH in den Varianten GPON (GPON, XGS-PON) und Punkt-zu-Punkt, FTTB/G.fast 212 MHz, DOCSIS3.1 sowie FTTC (VDSL2 35b) berücksichtigt. Funk-basierte Technologien werden in erster Linie als komplementäre Technologien für Festnetz-Breitbandanschlüsse gesehen, bei denen - wie bisher - mobile Anwendungen im Vordergrund stehen. Diese werden daher im Folgenden nicht weiter untersucht.

Eine geeignete Gliederung von Telekommunikationsnetzen kann mit dem ISO-OSI Referenzmodell erfolgen (vertikale Gliederung). Darüber hinaus können Netze noch in Teilnehmer-, Zugangs- (Access-) und Kernnetze (Backbone) unterteilt werden (horizontale Gliederung) [3]. Eine Ende-zu-Ende Verbindung im Internet besteht aus folgenden Abschnitten:

1. Teilnehmernetz: Netz innerhalb der Teilnehmerlokation jenseits der TAE-Dose/Netzabschluss (engl. Network Termination [NT]).
2. Zugangsnetz: Netzabschnitt vom NT bis zur ersten vermittelnden Einheit im Netz (IP-Router).
3. Kernnetz: Weitverkehrsübertragung und Vermittlung bis zu einem Internet-Koppelpunkt (Gateway).

¹ VDSL2 35b wird auch als Super-Vectoring bezeichnet.

4. In der Regel weitere IP-Kernetze anderer Netzbetreiber (Transitnetze, werden auch als Autonome Systeme bezeichnet).
5. Ziel-Server/-Datacenter.

Die Abschnitte 2. und 3. stehen im Verantwortungsbereich des entsprechenden Telekommunikations-Netzbetreibers. Befindet sich der Ziel-Server im eigenen IP-Kernetz, so entfällt der Abschnitt 4.

Mit dem OSI-Modell erhält man folgende Matrix in Bezug auf die vorliegende Untersuchung der Nachhaltigkeit von Zugangnetz-Technologien:

	OSI Layer 0 (passive Infrastruktur)	OSI Layer 1-2 (aktive Netzknoten)	OSI Layer 3-7	Management Layer
Herstellung	x	(ja)	x	x
Installation	x	x	x	x
Betrieb	x	ja	x	x
Entsorgung	x	(ja)	x	x

TABELLE 1: ÜBERSICHT ÜBER DIE VERSCHIEDENEN ASPEKTE IN BEZUG AUF NACHHALTIGKEIT VON TELEKOMMUNIKATIONSNETZ-TECHNOLOGIEN.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Aspekte in Bezug auf die Nachhaltigkeit von Zugangnetz-Technologien und den Umfang der im vorliegenden Gutachten betrachteten Aspekte (in Tabelle 1 mit „ja“ gekennzeichnet).

OSI Layer 0 bezeichnet die passive Infrastruktur (d.h. Kupferdoppelader bei FTTC, Koaxialkabel bei DOCSIS bzw. Glasfaser bei FTTH). Kupferdoppeladern sowie Koaxialkabel wurden in Deutschland bereits vor mehreren Jahrzehnten installiert. Hier erfolgt zwar noch eine Wartung bei Störungen (z.B. Kabelunterbrechungen), aber in der Regel keine Neuinstallation mehr. Auch Glasfasernetze sind zumindest im Kernnetz bereits seit vielen Jahrzehnten vorhanden: So sind Deutschland alle Hauptverteiler (HVt), der überwiegende Teil der rund 406.000 Kabelverzweiger (KVz) und Ende 2020 ca. 8,3 Mio. [4] der 41,4 Haushalte direkt über Glasfasern angebunden. Zumindest mittel- bis langfristig ist davon auszugehen, dass der überwiegende Teil der heute noch nicht über Glasfaser angebundenen Kabelverzweiger, Haushalte sowie Mobilfunk-Basisstationen ebenfalls über Glasfaser versorgt werden. *Die passive Infrastruktur wird daher als vorhanden vorausgesetzt und im Rahmen des vorliegenden Gutachtens nicht betrachtet.*

Die größten Unterschiede bezüglich der Nachhaltigkeit der verschiedenen Access-Technologien werden sich bei den aktiven Netzelementen (OSI Schicht 1-2) in Bezug auf Betrieb (Leistungsaufnahme) sowie Herstellung und Entsorgung (Anzahl bzw. Gesamtgewicht) ergeben. Diese sollen im vorliegenden Gutachten untersucht werden.

Sowohl durch die weltweite Erhöhung der Anzahl der Breitband-Kunden als auch durch die Erhöhung der mittleren Datenrate pro Kunde hat sich in den letzten 10 Jahren der Anteil des Stromverbrauchs von Zugangnetzen am gesamten Stromverbrauch der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) erhöht, so dass derzeit Zugangnetze den größten Anteil am Stromverbrauch ausmachen [5;6]. Das Kernnetz ist daher nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

Ebenfalls nicht berücksichtigt wird der Management Layer da davon auszugehen ist, dass dessen Auswirkungen in Bezug auf die Nachhaltigkeit bei allen genannten Zugangstechnologien vergleichbar sein wird.

Die in diesem Gutachten berechneten Werte wurden mit Werten aus realen Produktionsnetzen von FTTC und FTTH Netzbetreibern abgeglichen und stehen in guter Übereinstimmung mit diesen.

Bisherige Untersuchungen

Der Stromverbrauch sowie die Nachhaltigkeit von Telekommunikations- und Zugangsnetzen wurde bereits in verschiedenen Studien untersucht. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über diese Studien, den Umfang der Untersuchungen sowie die zentralen Ergebnisse.

Studie	Gegenstand/Umfang der Untersuchungen	Zentrale Ergebnisse
PWC 2008 [5]	Es wurde untersucht, nach wie vielen Jahren die Implementierung von typischen FTTH Netzen (GPON und Punkt-zu-Punkt) klimaneutral ist. Dabei wurden die Herstellung, die Installation und der Betrieb sowohl der aktiven als auch der passiven Infrastruktur sowie die zu erwartenden positiven Effekte durch Telearbeit, Telemedizin und Home Assistance berücksichtigt.	In den ersten 15 Jahren der Implementierung von FTTH Netzen können Treibhausgas (THG)-Emissionen in Höhe von ca. 330 kg CO ₂ -Äquivalent pro Jahr und Teilnehmer eingespart werden. Für die folgenden 15 Jahre steigt die Einsparung auf 780 kg CO ₂ -Äquivalent pro Jahr und Teilnehmer, da das Netzwerk bereits installiert ist und nur noch ein Teil der Infrastruktur erneuert werden muss.
TU Wien 2011 [6]	Stromverbrauch sowie die Auswirkung auf die Treibhausgas-Emissionen der Zugangstechnologien: ADSL2+, VDSL2 symmetrisch, DOCSIS3.0, FTTH GPON und FTTH Punkt-zu-Punkt. Nicht berücksichtigt wurden die unterschiedlichen Reichweiten von FTTH und FTTC sowie der Stromverbrauch für die Kühlung der Systemtechnik.	<ul style="list-style-type: none"> • FTTH Technologien haben bezogen auf die Bitrate einen fast um eine Größenordnung geringeren Stromverbrauch als Kupfer-basierte Technologien (FTTC/HFC). • Durch eine ausschließliche Verwendung von FTTH (GPON) könnte man die Treibhausgas Emissionen pro Gbit/s um etwa 88 % reduzieren.
University of Melbourne 2011 [7]	Stromverbrauch von drahtlosen (WIMAX, UMTS) und leitungsgebundenen Zugangstechnologien (ADSL, VDSL, HFC/DOCSIS, GPON, FTTH Punkt-zu-Punkt).	<ul style="list-style-type: none"> • Optische Zugangstechnologien (GPON, FTTH Punkt-zu-Punkt) sind bei hohen Bitraten die energieeffizientesten Technologien. Ab Teilnehmerbitraten von einigen Mbit/s sind die leitungsgebundenen Technologien deutlich effizienter als die drahtlosen Technologien, und GPON ist mit 7,5 W pro Teilnehmer die effizienteste Zugangstechnologie gefolgt von ADSL (8W pro Teilnehmer), HFC (8,5 W pro Teilnehmer), FTTH Punkt-zu-Punkt (12 W pro Teilnehmer) und VDSL (14 W pro Teilnehmer). • Durch Effizienzsteigerung bei den Netzelementen werden drahtlose Technologien auch in 2020 mindestens einen um Faktor 10 höheren Energieverbrauch als leitungsgebundene Technologien haben, und GPON wird weiterhin die Zugangstechnologie mit dem geringsten Energieverbrauch sein.
R. Coomonte et al. [8]	Energieeffizienz von GPON und LTE	Der absolute Stromverbrauch pro Teilnehmer ist bei FTTH (GPON) zwar höher als bei LTE, beim Stromverbrauch pro Teilnehmer und Mbit/s ist

		hingegen FTTH (GPON) deutlich energieeffizienter als LTE.
Spectaris 2019 [9]	Auswirkungen der Photonik (u.a. auch FTTH Netze) auf die globale Nachhaltigkeit.	Unter Berücksichtigung der weltweiten Teilnehmerzahlen durch FTTH Netze im Vergleich zu anderen Technologien können aktuell etwa 13 Mio. Tonnen CO ₂ eq vermieden. Dieser Wert steigt auf 39 Mio. Tonnen im Jahr 2030.
IEA 2019 [10]	Weltweiter Energiebedarf von Datenzentren und Datennetzen	<ul style="list-style-type: none"> • In 2018 betrug der weltweite Energiebedarf von Datenzentren mit 198 TWh etwa 1 % und der von Datennetzen mit 260 TWh etwa 1,1% des weltweiten Energiebedarfes. Von den 260 TWh entfallen etwa 1/3 auf Festnetze und 2/3 auf Mobilfunknetze. • Der Internetverkehr wird weiter stark zunehmen. Der weitere Energiebedarf von Datenzentren und Telekommunikationsnetzen wird davon abhängen, inwieweit energieeffiziente Technologien weiterentwickelt werden können.
BREKO 2020 [18]	Gutachten „Nachhaltigkeitsvergleich der Zugangsnetz-Technologien FTTC und FTTH“	FTTH Technologien sind in jedem betrachteten Szenario (deutschlandweit, städtische, halbstädtische und ländliche Gebiete) und für fast jeden Auslastungsgrad nachhaltiger als FTTC. Sie sind sowohl günstiger beim Stromverbrauch als auch in Bezug auf das Gesamtgewicht der Systemtechnik inkl. der NT/CPE beim Teilnehmer.
Umwelt Bundesamt [20]	Hintergrundinformationen Klimawirkung von Videostreaming & Co.	Während die Treibhausgasemissionen im Rechenzentrum mit 1,45 g CO ₂ -Äquivalente pro Stunde Videostream konstant bleiben, unterscheiden sich die Treibhausgasemissionen im Netzwerk sehr stark. Das Glasfasernetz (FTTH – „fibre to the home“) ist am effizientesten. Wird der Stream über das Glasfasernetz geleitet, so führt dies zu Treibhausgasemissionen in Höhe von 2 g/h. Beim kabelgebundenen Breitbandanschluss (VDSL – „very high speed digital subscriber line“) benötigt der Stream mit etwa 4 g CO ₂ e rund das Doppelte. Noch höhere CO ₂ -Fußabdrücke hat die Übertragung in mobilen Zugangsnetzen. Das moderne 5G-Netz liegt bei rund 5 g, das derzeit gängige 4G-Mobilfunknetz (LTE) bei rund 13 g CO ₂ e pro Stunde Videostreaming.

TABELLE 2: ÜBERSICHT ÜBER DIE BISHERIGEN STUDIEN ZUR NACHHALTIGKEIT VON TELEKOMMUNIKATIONS- UND ZUGANGSNETZEN.

Fasst man die Ergebnisse der bisherigen Studien zusammen so lässt sich festhalten, dass optische Zugangstechnologien (insbes. GPON) bezogen auf die Bitrate deutlich energieeffizienter als Kupfer-basierte (ADSL, VDSL, HFC) oder Funk-basierte (UMTS, WIMAX, LTE) Zugangstechnologien sind. Die Studien sind z.T. jedoch schon einige Jahre alt, und die Leistungsaufnahme der Systemtechnik konnte seitdem in vielen Bereichen signifikant reduziert werden. Die Effizienzsteigerung der Netzelemente lässt sich am Beispiel FTTH (GPON) verdeutlichen. Die OLT aus Ref. [7] kann maximal 1024 Teilnehmer bedienen und hat eine

Leistungsaufnahme von 1.340 W. Die im Rahmen dieses Gutachtens betrachtete OLT kann 3072 Teilnehmer bedienen und hat eine maximale Leistungsaufnahme von nur 654 W. Dies entspricht einer Effizienzsteigerung von mehr als Faktor sechs in etwa 9 Jahren.

Nachhaltigkeit von Internet-Zugangnetz-Technologien

Für einen Vergleich der Leistungsaufnahme der verschiedenen Zugangnetztechnologien wird nur der Teil des Zugangnetzes betrachtet, der für die jeweiligen Technologien unterschiedlich ist.

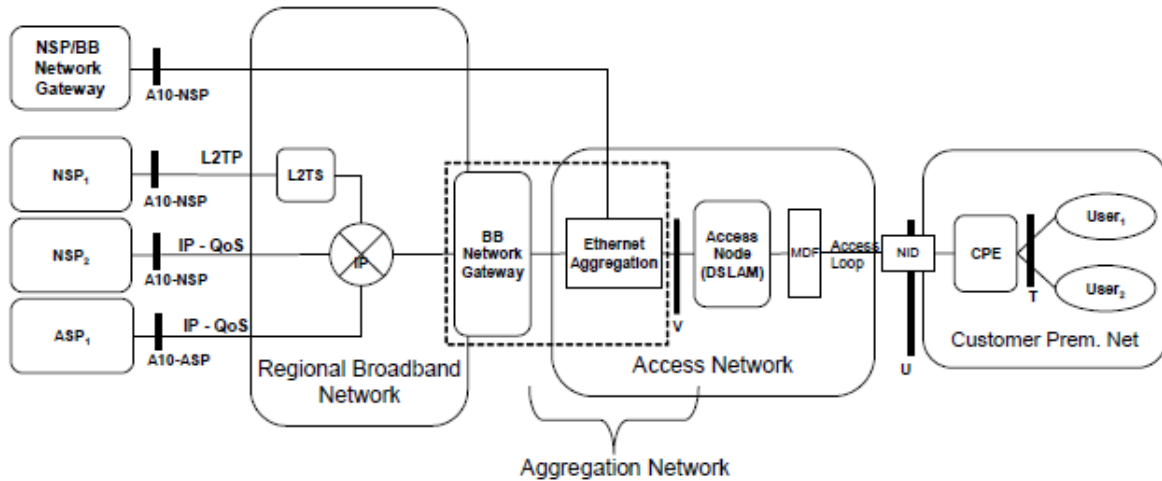


ABBILDUNG 3: NETZARCHITEKTUR FÜR EHTERNET-BASIERTE DSL BREITBAND-ZUGANGSNETZE. QUELLE: [12]

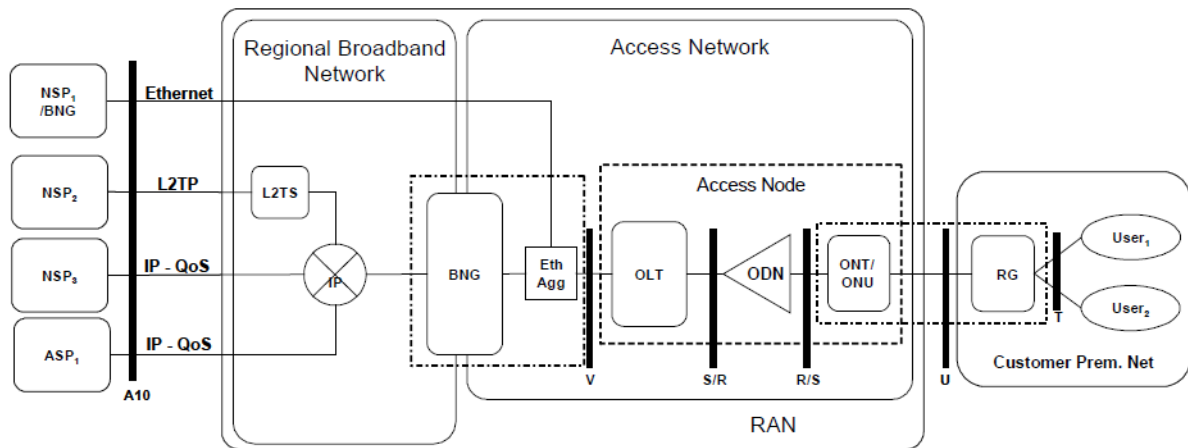


ABBILDUNG 4: NETZARCHITEKTUR FÜR EHTERNET-BASIERTE GPON BREITBAND-ZUGANGSNETZE. QUELLE: [13]

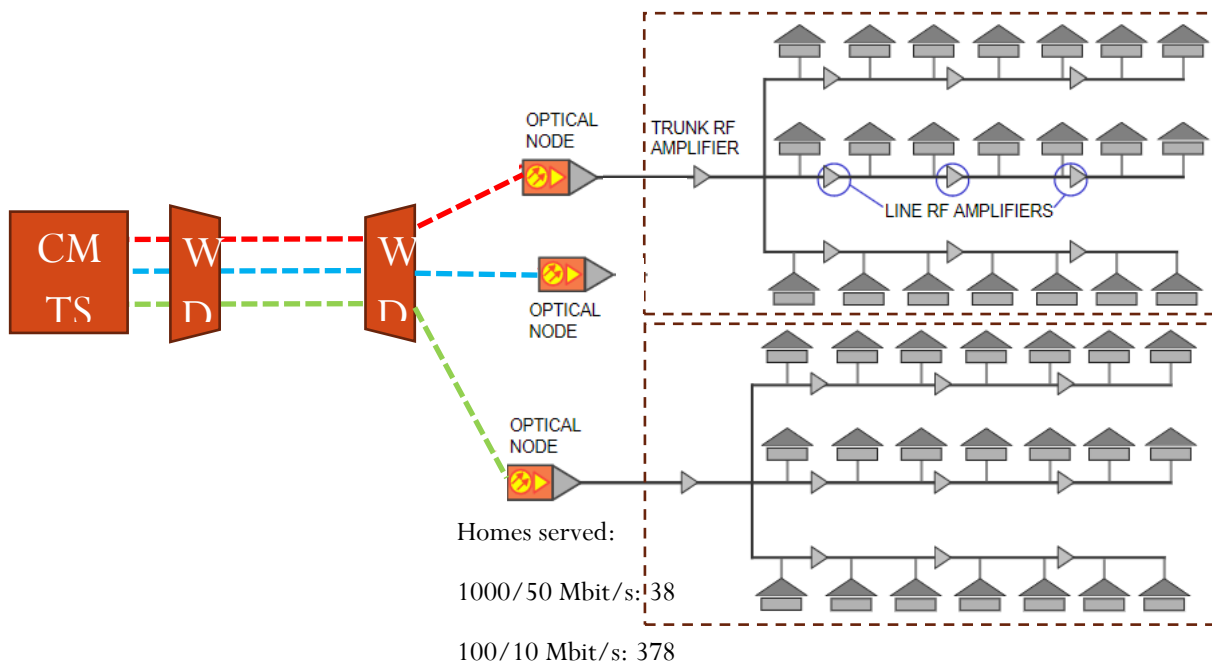


ABBILDUNG 5: NETZARCHITEKTUR FÜR DOCSIS-BASIERTE BREITBAND-ZUGANGSNETZE. QUELLE: MODIFIZIERTE WIKIPEDIA-ABBILDUNG.

Abbildung 3 bis Abbildung 5 zeigen die Netzarchitektur für Ethernet-basierte VDSL, DOCSIS und GPON Breitband-Zugangsnetze gemäß [12;13]. Die in Abbildung 4 dargestellte Architektur lässt sich sinngemäß auch auf FTTH Punkt-zu-Punkt Netze übertragen. Für die vorliegende Untersuchung werden als Referenzpunkte die Punkte V und U für den Vergleich verwendet. Das Ethernet-Aggregationsnetz jenseits des Referenzpunkts V in Richtung Netz wird in allen Fällen als vergleichbar angesehen. *Es sei allerdings angemerkt, dass diese Annahme für FTTC eine optimistische Annahme darstellt, da in der Praxis wesentlich mehr FTTC DSLAM als FTTH POP Standorte (Point-of-Presence) erforderlich sein werden.*

Für das vorliegende Gutachten wurde Netztechnik (d.h. die Netzelemente im Kabelverzweiger, FTTH POP, FTTB POP bzw. DOCSIS POP) der Firmen Keymile, Nokia und Cisco zugrunde gelegt.

Was die Leistungsaufnahme der Netzelemente beim Teilnehmer (CPE bzw. NT) anbelangt, so wird hier nur die Leistungsaufnahme für die eigentliche Modem Funktionalität (Network Termination [NT]) und damit die Leistungsaufnahme bis zum Referenzpunkt U zugrunde gelegt, da die heute üblichen weiteren CPE Funktionalitäten (z.B. WLAN, Ethernet-Ports, DECT, a/b, ISDN, NAS) signifikante Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme der CPE haben können und stark vom Nutzerverhalten abhängen². Für die Leistungsaufnahme der Network Termination beim Teilnehmer wurde für jede Zugangstechnologie das NT mit der geringsten, derzeit am Markt kommerziell verfügbaren Leistungsaufnahme angenommen (siehe Tabelle 3).

NT	Leistung [W]	Gewicht [g]
GPON ONT (Keymile)	2,2	100
XGS-PON (Nokia)	5,5	336
GbE PtP (Genexis FiberTwist-P2110)	1,8	176

² Gemäß Angaben von AVM benötigt die Fritzbox 7590 durchschnittlich 9-10 W und max. 30 W [14]. Im Test [15] wurde für die Fritzbox 7490 je nach aktivierten Features ein Stromverbrauch von 5,4 bis 12,3 W gemessen. Eigene Messungen an der Fritzbox 7583 ergaben für VDSL2 17a/35b einen Stromverbrauch von 8,4 bis 14,1 W. Das Nokia GPON CPE: G-140W-C mit 1xPOTS, 4xGigE, WLAN: 2x2 MIMO for 802.11b/g/n and 802.11ac benötigt nach Herstellerangabe 17,9 W und das Nokia XGS-PON CPE: XS-250WX-A mit 1xPOTS, 4xGigE, 1x10GigE, WLAN: 802.11b/g/n: 2,4 G and 5 G dualband concurrent Wi-Fi, 802.11ac 45 W.

VDSL2 17a/35b (Nokia F-010G-B)	6,1	320
G.fast (Allnet ALL-BM300)	4,8	400
DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s ³	5,5	250
DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s	5,5	250

TABELLE 3: FÜR DIE BERECHNUNGEN ANGENOMMENE LEISTUNGS-AUFNAHME UND GEWICHTS DER NETWORK TERMINATION (NT) BEIM TEILNEHMER.

Vergleich Leistungsaufnahme und Gewicht der Systemtechnik

In diesem Abschnitt soll die Leistungsaufnahme für die reine Systemtechnik inkl. NT und deren Gewicht zwischen den Referenzpunkten V und U pro Teilnehmer für verschiedenen Auslastungsgrade (Teilnehmerzahlen) ermittelt werden. Um die unterschiedlichen Bitraten der verschiedenen Zugangstechnologien zu berücksichtigen, werden diese Kennzahlen ebenfalls auf die Bitrate bezogen.

Folgende Systemtechnikvarianten wurden betrachtet:

- GPON: GPON mit max. 96 ports bzw. $96 \times 32 = 3072$ Teilnehmern (Annahme Splitfaktor 1:32)
Annahme nominale (vermarktete) Bitrate im downstream/upstream: 0,25/0,125 Gbit/s
- XGS-PON: XGS-PON mit max. 48 ports bzw. $48 \times 32 = 1536$ Teilnehmern (Annahme Splitfaktor 1:32)
Annahme nominale Bitrate im downstream/upstream: 1/0,5 Gbit/s
- GbE PtP (Gigabit-Ethernet Punkt-zu-Punkt): 480 ports bzw. Teilnehmer
Annahme nominale Bitrate im downstream/upstream: 1/1 Gbit/s
Anmerkung: mit Punkt-zu-Punkt Systemen sind auch Teilnehmerbitraten von 10/10 Gbit/s oder sogar 100/100 Gbit/s möglich. In diesem Fall würden sich noch günstigere Werte ergeben, wenn man die Leistungsaufnahme und das Gewicht auf die Datenraten bezieht.
- VDSL2 35b: 144 ports bzw. Teilnehmer mit 48 ports Board Level Vectoring
Annahme nominale Bitrate im downstream/upstream: 0,25/0,05 Gbit/s
- FTTB/G.fast 212 MHz: 16 ports bzw. Teilnehmer pro DPU/G.fast DSLAM. Anbindung an FTTB POP über ein Nx10 Gbit/s Ethernet Punkt-zu-Punkt System.
Annahme nominale Bitrate im downstream/upstream: 1/0,1 Gbit/s
- DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s: Clustergröße 378 Teilnehmer
Annahme nominale Bitrate im downstream/upstream: 0,1/0,01 Gbit/s
- DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s: Clustergröße 38 Teilnehmer
Annahme nominale Bitrate im downstream/upstream: 1/0,05 Gbit/s

Für die Modellierung des DOCSIS3.1 Netzes wurden folgende Annahmen getroffen:

- Das DOCSIS-Netz unterstützt Frequenzen bis 1,2 GHz. Der gesamte Frequenzbereich kann für Internet-Zugänge verwendet werden, so dass mit einer 4096-QAM und 25 kHz Subcarrier Spacing pro Cluster 9,45/1,88 Gbit/s als Summenbitrate (downstream/upstream) zur Verfügung stehen.
- Es wird eine Überbuchung von 4:1 angenommen. Dadurch ergeben sich folgende Clustergrößen:
 - DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s: max. 378 Teilnehmer pro Cluster
 - DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s: max. 38 Teilnehmer pro Cluster
- Für die Gebäudeverstärker wurde pro Teilnehmer eine Leistungsaufnahme von 5 W angenommen [19].
- Die Anzahl der RF Verstärker pro Cluster basiert auf realen Produktionsnetzen differenziert nach städtischen, halbstädtischen und ländlichen Gebieten.

³ Entsprechend den Vorgaben aus Ref. [11]. Der reale Stromverbrauch liegt im Bereich 11-13 W [19].

- Die Optical Nodes sind über ein 96x100 Gbits/s DWDM-System an das CMTS angebunden. In städtischen und halbstädtischen Gebieten werden keine optischen Verstärker (EDFA) verwendet, in ländlichen Gebieten ein optischer Verstärker pro DWDM-System.

In Bezug auf die nominalen Bitraten wurden bei GPON sehr konservative und bei VDSL optimistische Annahmen getroffen. Die vermarkteten Bitraten sind bei GPON in der Regel deutlich höher. Die mit VDSL2 erzielbaren Bitraten sind stark von der Entfernung abhängig und liegen ab Leitungslängen von 200 bis 300 m unter den o.a. Werten. Auch bzgl. DOCSIS wurden sehr optimistische Annahmen getroffen, indem die Leistungsaufnahme des Kabelmodems mit nur 5,5 W angesetzt wurde und die gesamte Bandbreite für Internet-Zugänge vorgehalten wird. Bei Überschreitung der o.a. maximalen Teilnehmerzahlen wurden die Anzahl der Netzelemente entsprechend erhöht. Die Ergebnisse wurden als Funktion der Teilnehmerzahl in Schritte von 32 bis max. 3072 berechnet.

Vergleich Leistungsaufnahme

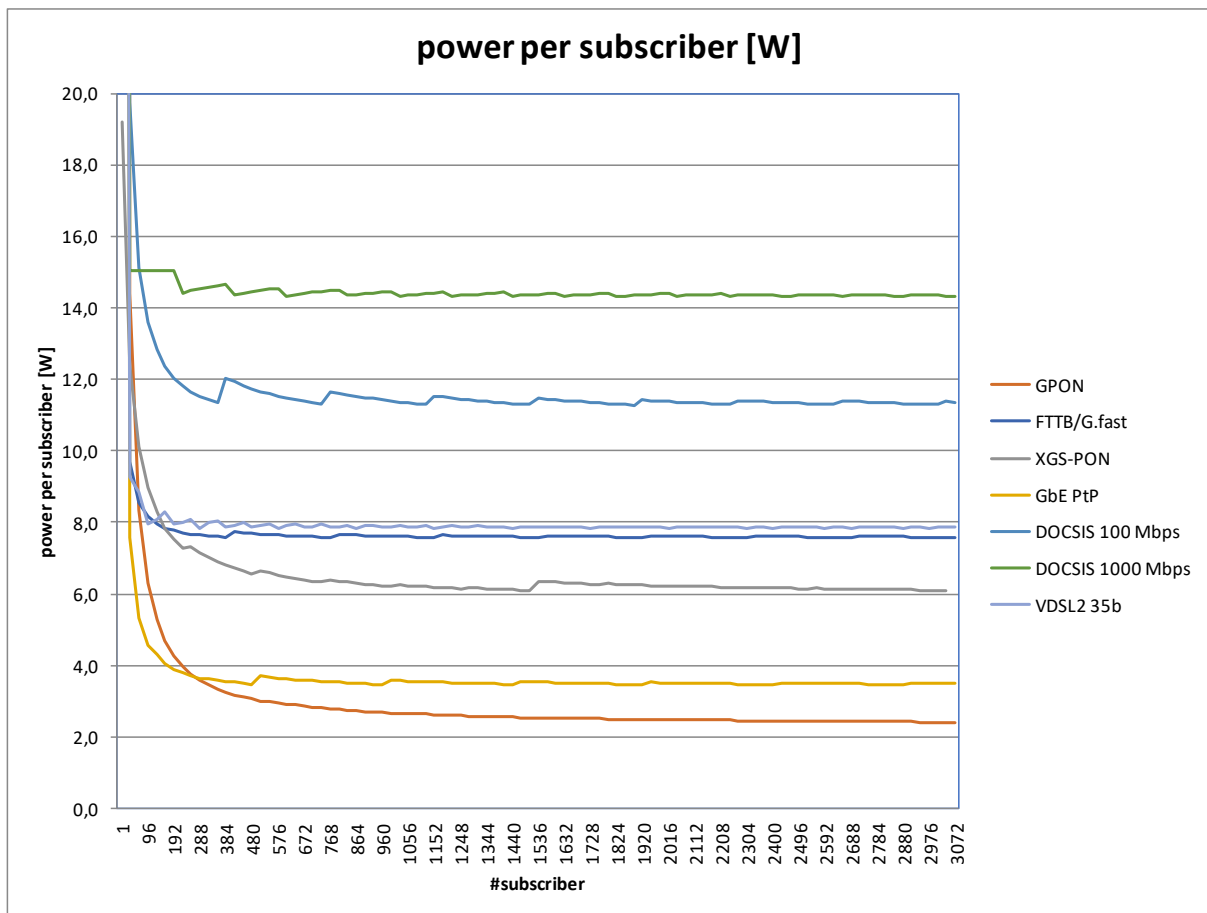


ABBILDUNG 6: LEISTUNGS-AUFNAHME DER VERSCHIEDENEN ZUGANGSTECHNOLOGIEN PRO TEILNEHMER ALS FUNKTION DER ANZAHL DER TEILNEHMER.

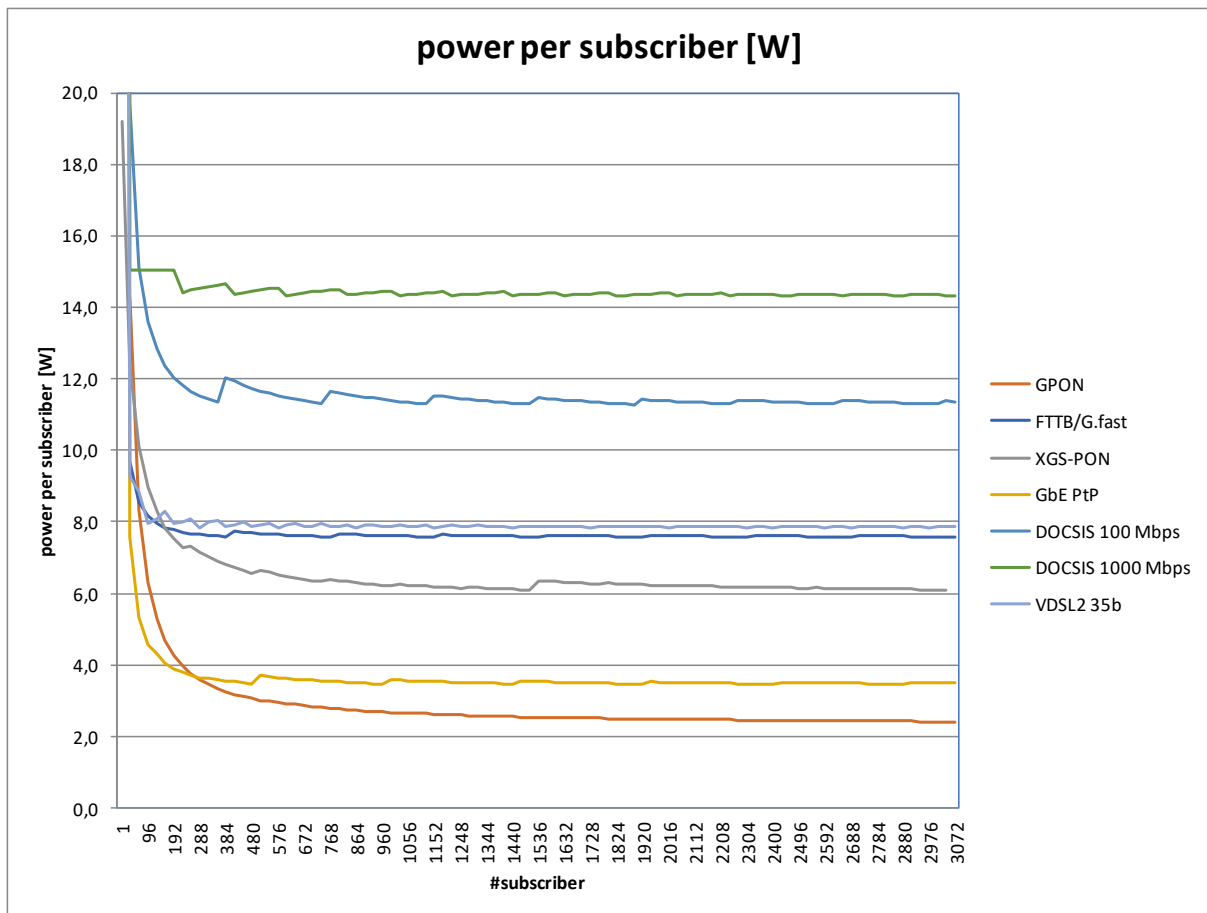


Abbildung 6 zeigt die Leistungsaufnahme der verschiedenen Zugangstechnologien inkl. NT beim Teilnehmer als Funktion des Auslastungsgrades. Man erkennt Folgendes:

- Für fast alle Auslastungsgrade ergibt sich mit GPON die geringste Leistungsaufnahme (ab ca. 1500 Teilnehmern 2,5 W pro Teilnehmer).
- Ab etwa 200 Teilnehmern weisen alle FTTH (GPON, XGS-PON, GbE PtP) Varianten eine geringere Leistungsaufnahme als FTTC, FTTB sowie DOCSIS auf.
- Ab etwa 500 Teilnehmern ändern sich die Werte kaum noch. Für 3072 Teilnehmer ergeben sich folgende Werte: 2,4 W für GPON; 3,5 W für GbE PtP; 6,1 W für XGS-PON; 7,6 W für FTTB; 7,9 W für VDSL2 35b; 11,4 W für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und 14,3 W für DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s. Anmerkung zu XGS-PON: Hätte man alternativ bei XGS-PON dieselben Teilnehmer-Bitraten wie für GPON, dafür aber aufgrund der vierfach höheren Gesamtbitrate einen Splitfaktor von 1:128 angesetzt, so würde die Leistungsaufnahme der OLT pro Teilnehmer anstatt 0,59 W nur 0,15 W und damit die Gesamtleistung pro Teilnehmer 5,65 W betragen.
- Ab einem bestimmten Auslastungsgrad (abhängig von der Zugangstechnologie zwischen 64 und 320 Teilnehmer pro Netzelement) ist der Leistungsaufnahme der NTs der dominante Anteil an der gesamten Leistungsaufnahme.

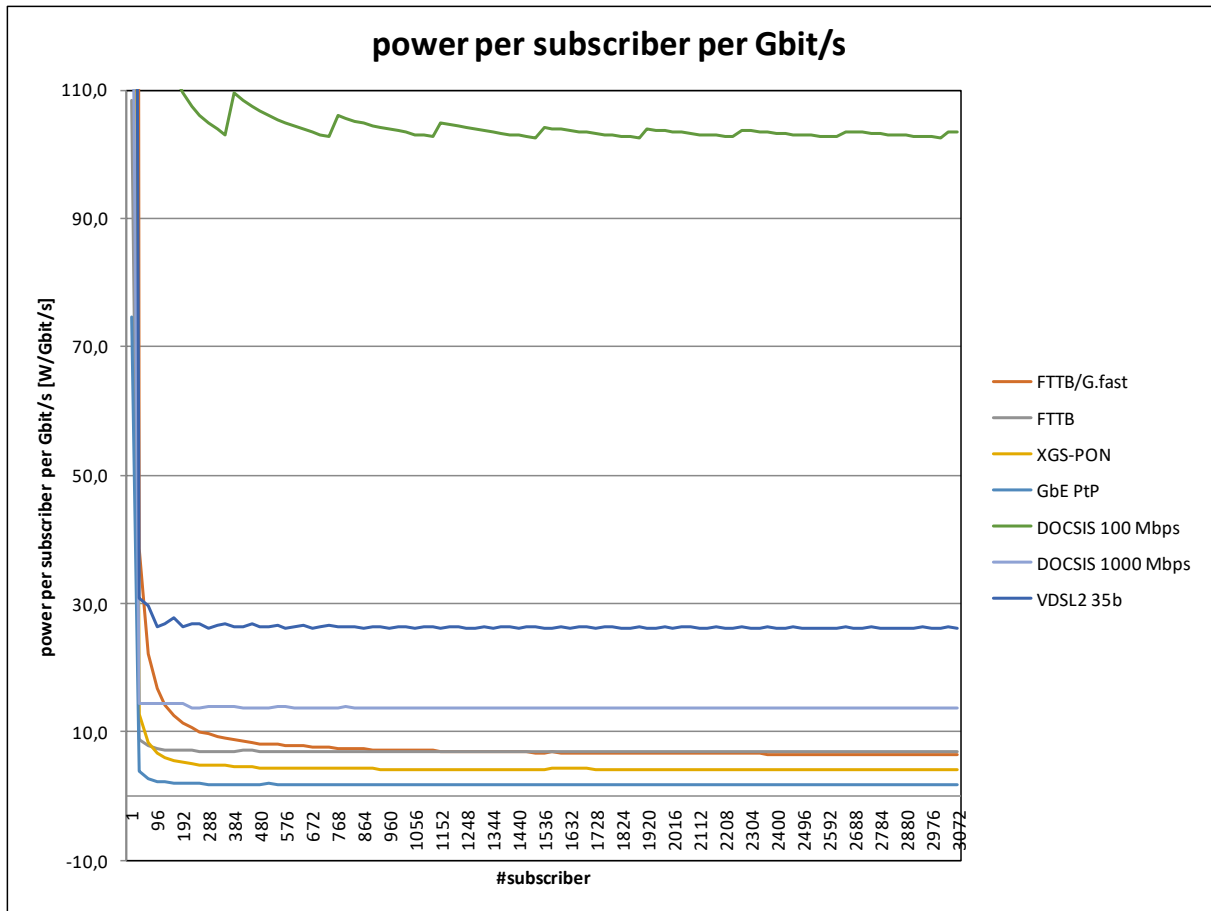


ABBILDUNG 7: LEISTUNGS-AUFNAHME DER VERSCHIEDENEN ZUGANGSTECHNOLOGIEN PRO TEILNEHMER UND GBIT/S ALS FUNKTION DER ANZAHL DER TEILNEHMER.

Die Darstellung in

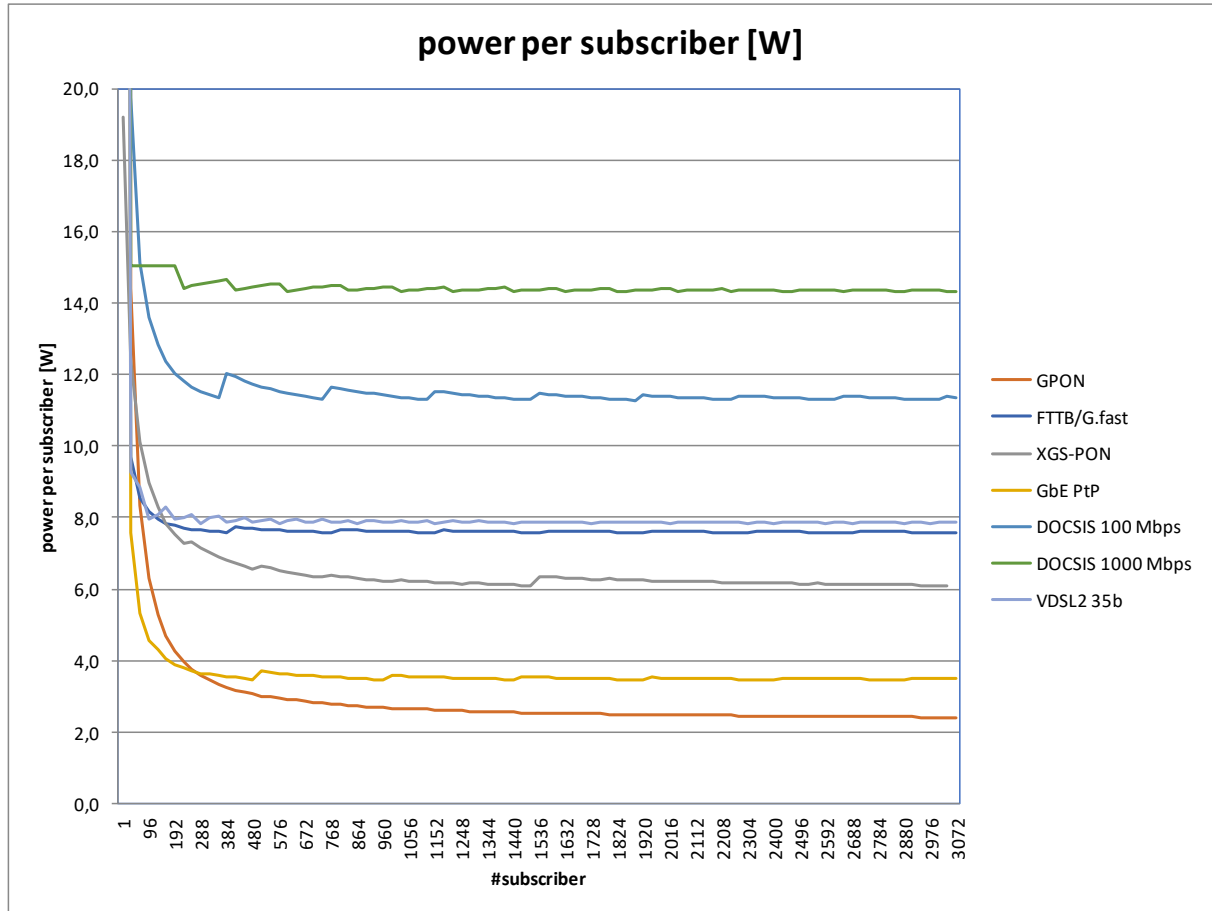


Abbildung 6 berücksichtigt nicht die in der Regel deutlich höheren Bitraten, die mit FTTH bzw. DOCSIS3.1

1000/50 Mbit/s erzielt werden können. Daher werden die Ergebnisse aus

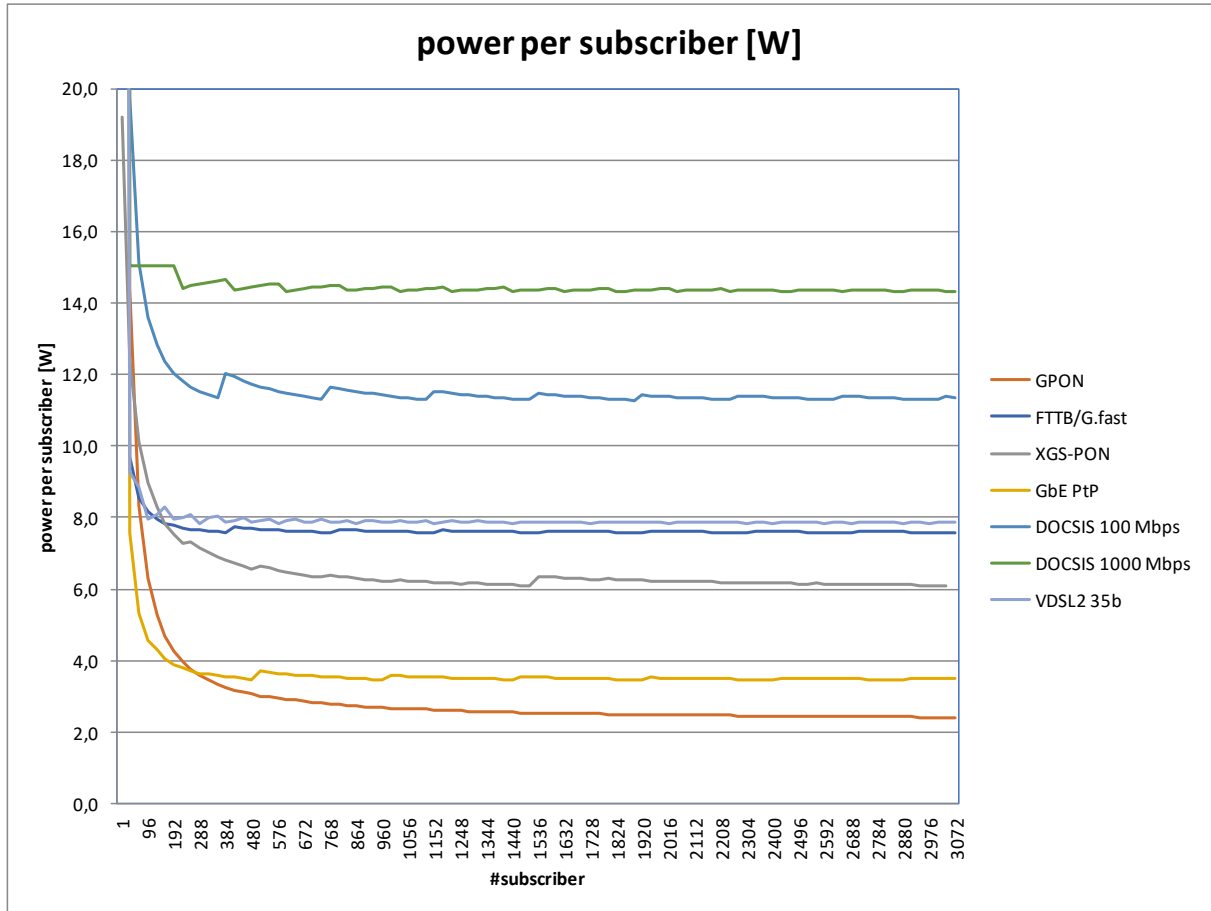


Abbildung 6 in einem zweiten Schritt auf die nominale Summenbitrate (downstream plus upstream) der

jeweiligen Zugangstechnologie bezogen (s.

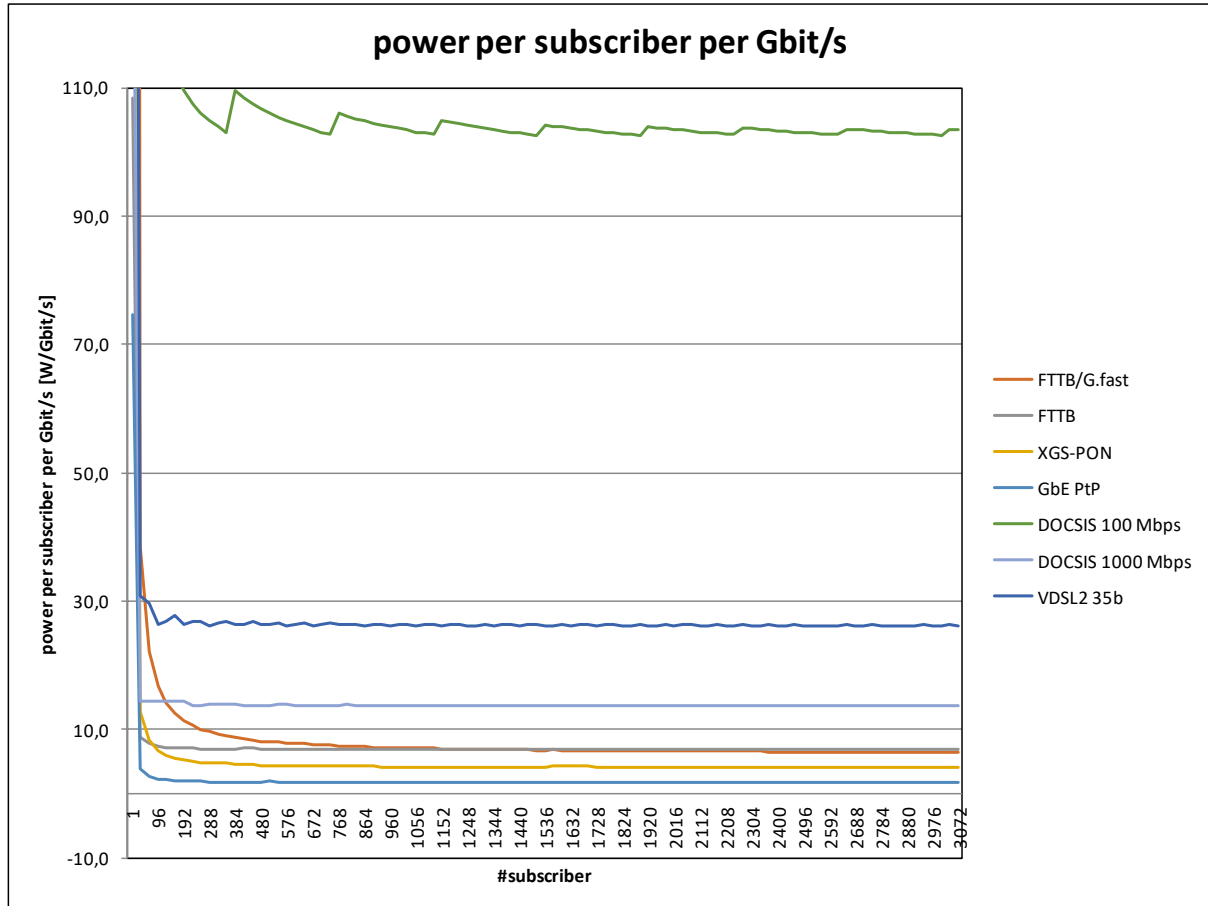


Abbildung 7). Bezogen auf die Summenbitrate weisen GbE PtP und XGS-PON die geringste Leistungsaufnahme pro Teilnehmer auf, gefolgt von GPON, FTTB und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s. Die mit Abstand höchste Leistungsaufnahme bezogen auf die Bitrate ergibt sich für VDSL2 35b und DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s, wobei die Leistungsaufnahme für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s fast viermal höher ist als für VDSL2 35b.

Fazit aus

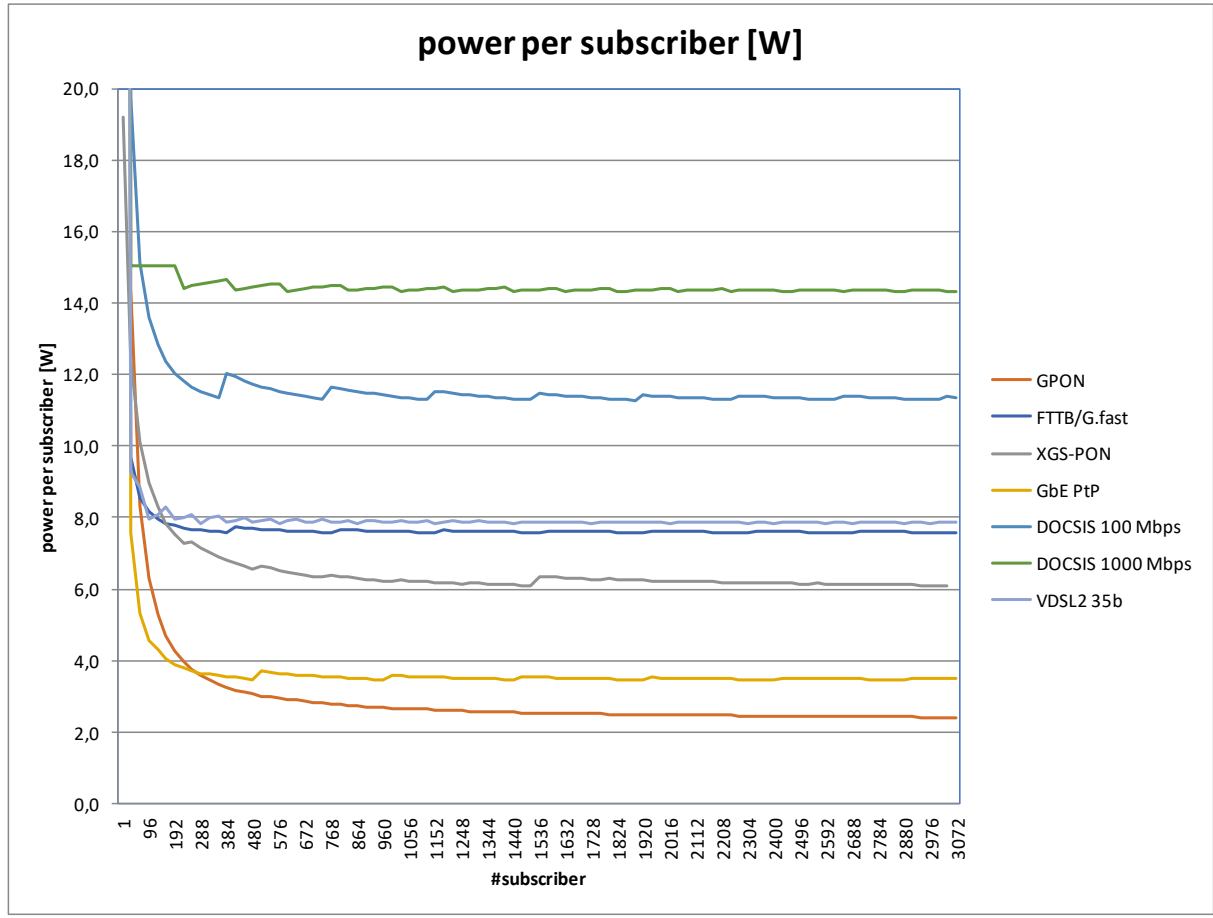


Abbildung 6 und

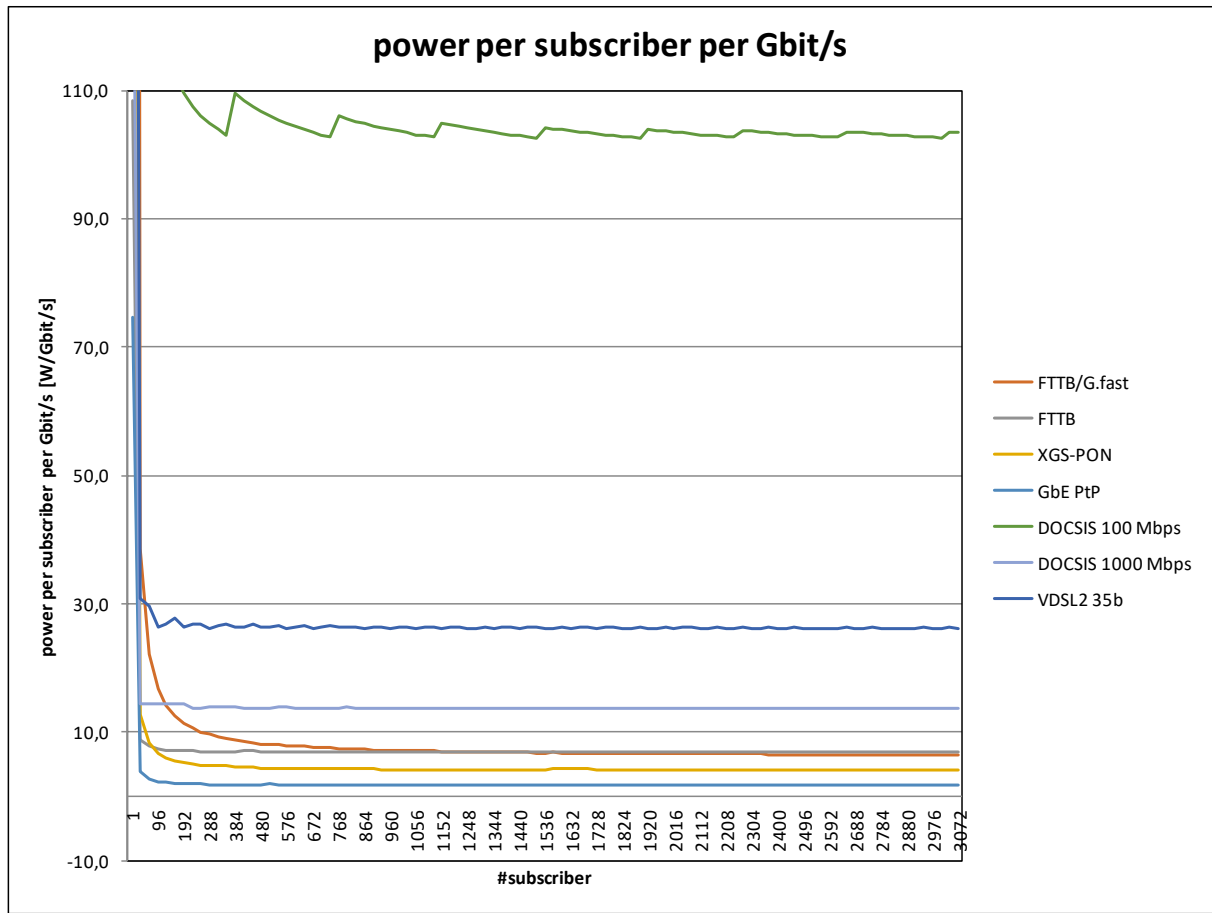


Abbildung 7: Ab einem bestimmten Auslastungsgrad (200 Teilnehmer pro Netzelement) ist die absolute Leistungsaufnahme pro Teilnehmer für die FTTH Technologien immer geringer als für FTTB, FTTC und DOCSIS, wobei sich mit FTTH GPON die kleinsten Werte ergeben. Bezieht man die Leistungsaufnahme pro Teilnehmer hingegen auf die Summenbitrate, so ergeben sich ebenfalls für FTTH immer geringere Werte als für FTTB, FTTC und DOCSIS. In diesem Fall weisen GbE PtP bzw. XGS-PON die geringsten Werte und VDSL2 35b bzw. DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s die mit Abstand größten Werte auf.

Vergleich Gewicht

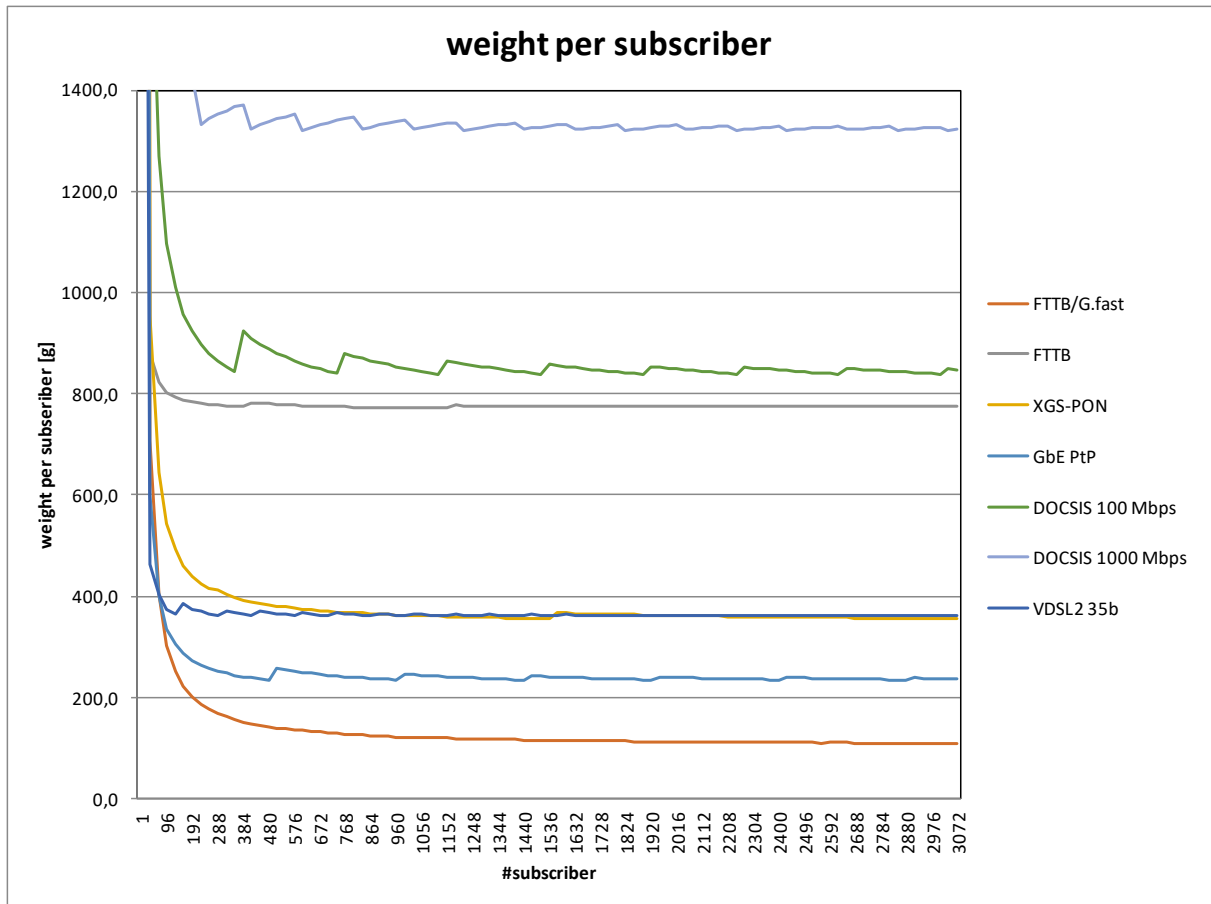


ABBILDUNG 8: GEWICHT FÜR DIE SYSTEMTECHNIK INKL. NT DER VERSCHIEDENEN ZUGANGSTECHNOLOGIEN PRO TEILNEHMER ALS FUNKTION DER ANZAHL DER TEILNEHMER.

Um erste Aussagen in Bezug auf die die benötigten Ressourcen für die Herstellung und Entsorgung der

Netzelemente zu bekommen, wurde zusätzlich das Gewicht der Netzelemente betrachtet. Das Ergebnis zeigt

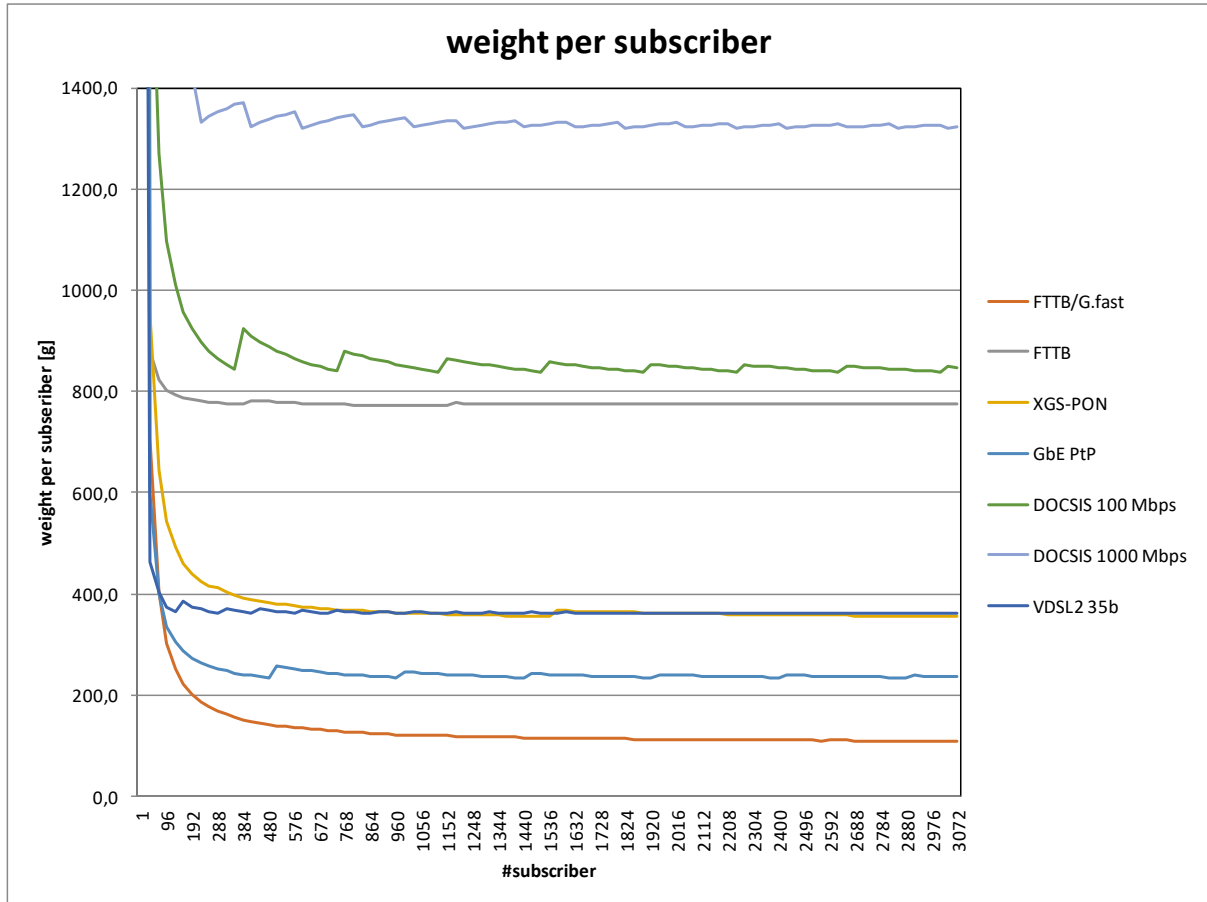


Abbildung 8. Man erkennt Folgendes:

- Für alle Auslastungsgrade ergibt sich mit GPON mit Abstand das geringste Gewicht (ab 1500 Teilnehmern 115 g pro Teilnehmer).
- Für DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s , DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und FTTB und ergibt sich das höchste Gewicht pro Teilnehmer.
- Ab etwa 500 Teilnehmern ändern sich die Werte kaum noch. Für 3072 Teilnehmer ergeben sich folgende Werte: 109 g für GPON; 237 g für GbE PtP; 355 g für XGS-PON; 362 g für VDSL2 35b; 774 g für FTTB und 848 g für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und 1320 g für DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s.
- Ab einem bestimmten Auslastungsgrad (abhängig von der Zugangstechnologie zwischen 64 und 224 Teilnehmer pro Netzelement) ist das Gewicht der NTs der dominante Anteil am Gesamtgewicht.

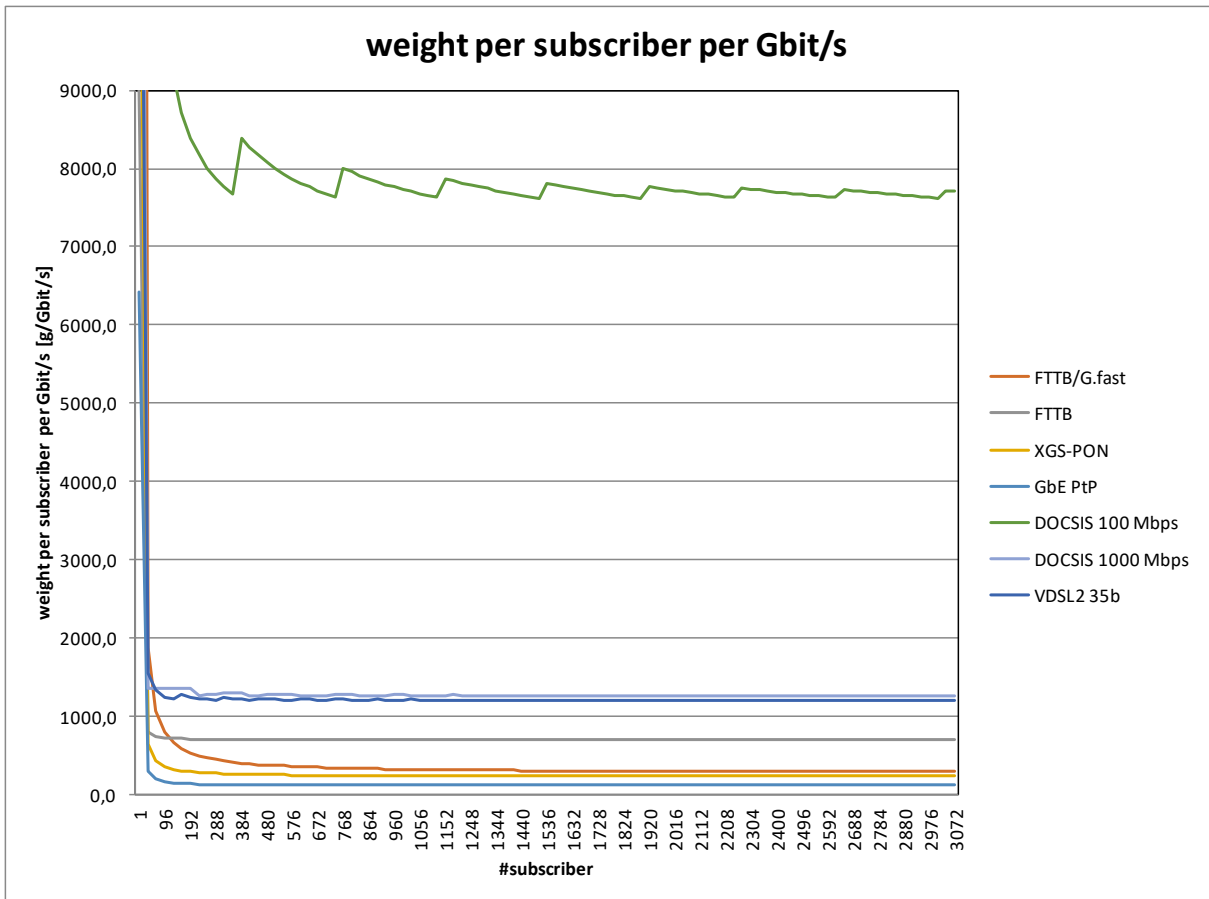


ABBILDUNG 9: GEWICHT FÜR DIE SYSTEMTECHNIK INKL. NT DER VERSCHIEDENEN ZUGANGSTECHNOLOGIEN PRO TEILNEHMER UND GBIT/S ALS FUNKTION DER ANZAHL DER TEILNEHMER.

Bezieht man das Gewicht auf die Summenbitrate der jeweiligen Zugangstechnologie, so ergibt sich ein anderes

Bild (s.

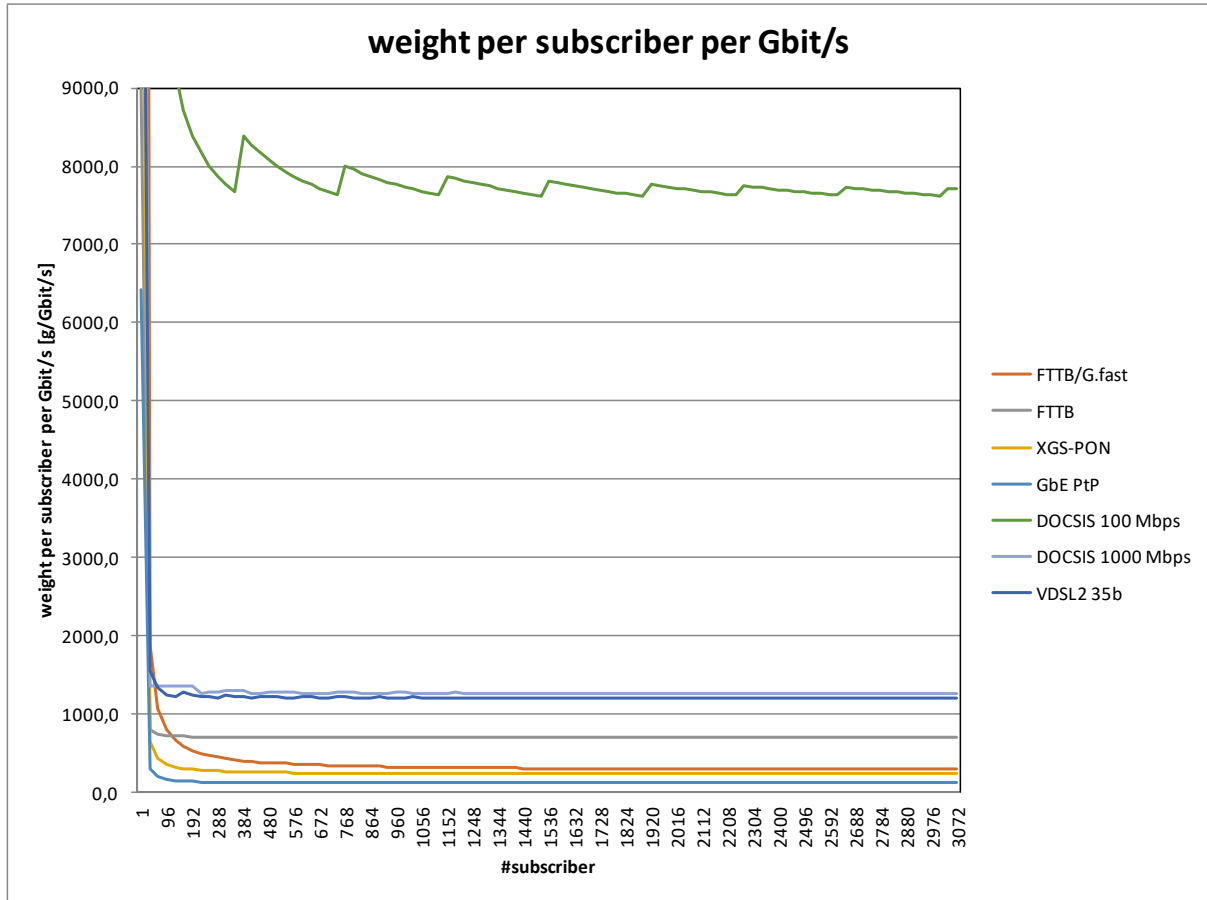


Abbildung 9). Bezogen auf die Summenbitrate weist GbE PtP das geringste Gewicht pro Teilnehmer auf, gefolgt von XGS-PON und GPON. FTTB, VDSL2 35b und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s weisen deutlich höhere Werte auf. Der mit Abstand höchste Wert ergibt sich aufgrund des höchsten absoluten Gewichts sowie der geringsten Summenbitrate aller hier betrachteten Zugangstechnologien für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s.

Fazit aus

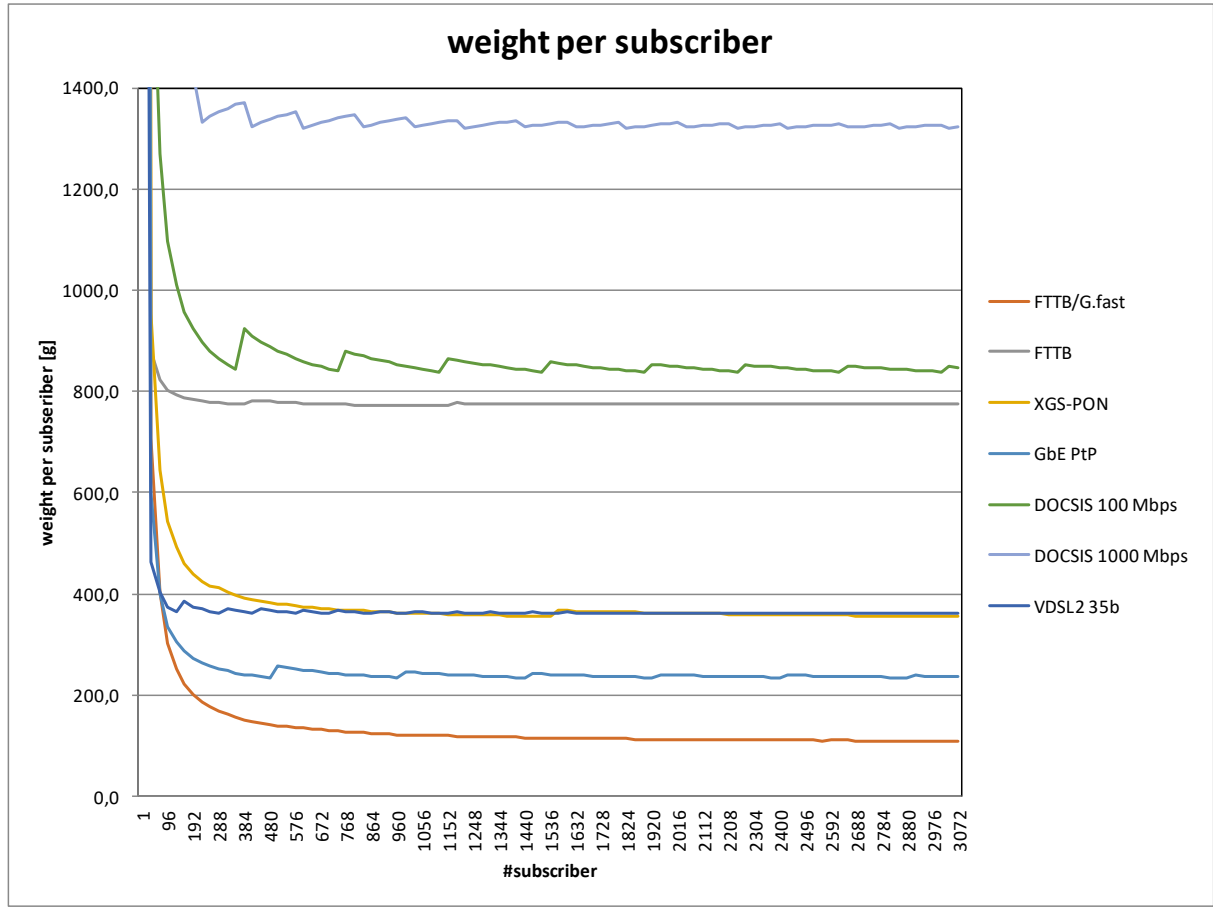


Abbildung 8 und

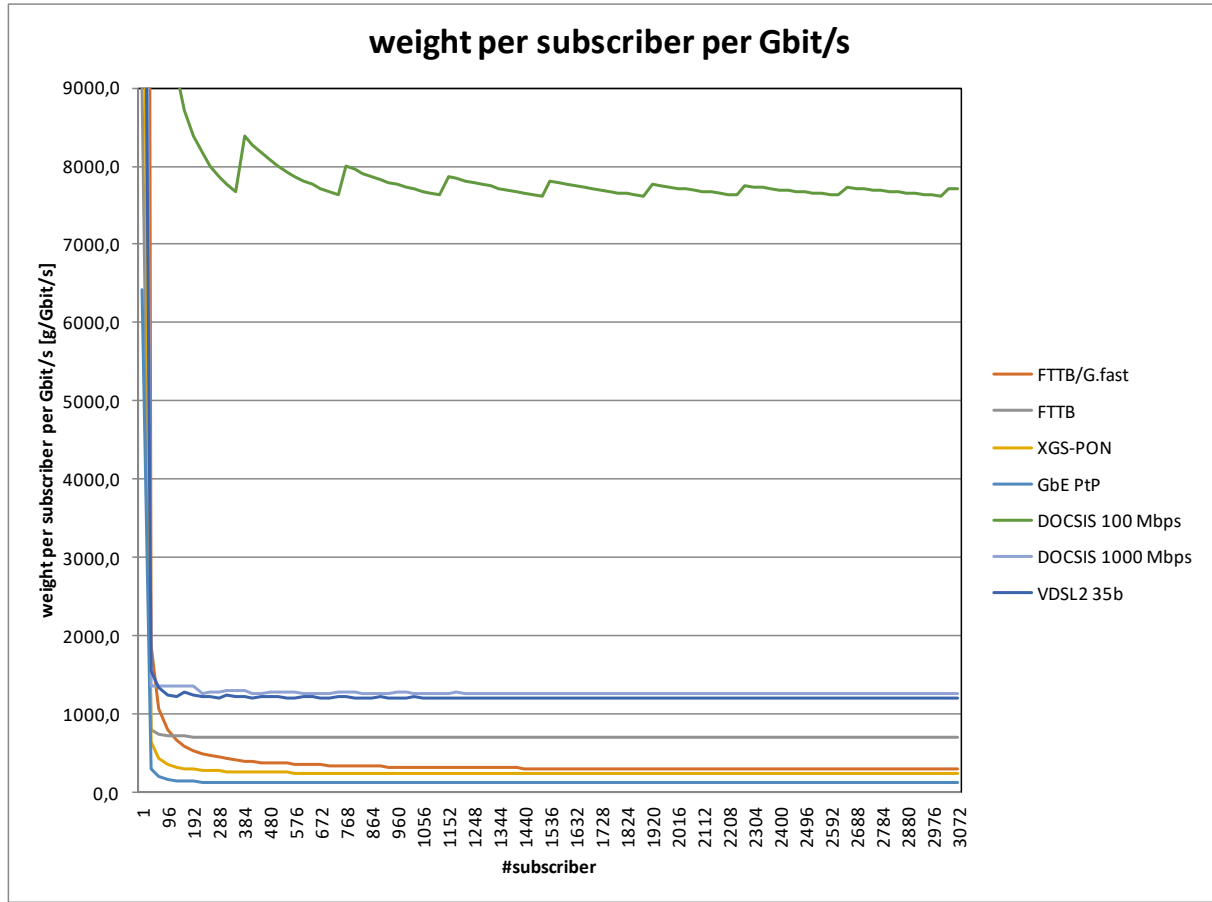


Abbildung 9: Ab einem bestimmten Auslastungsgrad (je nach Zugangstechnologie zwischen 64 und 224 Teilnehmer pro Netzelement) ist das NT Gewicht der dominante Anteil am Gesamtgewicht. Absolut gesehen weist FTTH GPON das geringste Gewicht pro Teilnehmer auf. Bezogen auf die Datenrate ist hingegen FTTH GbE PtP gefolgt von XGS-PON und GPON die leichteste Technologie. FTTB, VDSL2 35b und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s weisen deutlich höhere Werte auf. Der mit weitem Abstand höchste Wert ergibt sich für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s.

Deutschlandweite Planung

Im Folgenden soll die Leistungsaufnahme und das Gewicht der jeweiligen Zugangstechnologien für eine Gesamtversorgung Deutschlands unter folgenden Annahmen abgeschätzt werden:

- 40 Mio. Teilnehmer (Haushalte)
- 400.000 Kabelverzweiger
- Gesamtfläche Deutschland 357.582 km², davon in 2018 14,3 %, d.h. 51.134 km², Siedlungs- und Verkehrsfläche [16].
- 10.000 FTTH POP Standorte (4000 Teilnehmer pro FTTH POP)

Anmerkung: Die Reichweite eines FTTH Systems beträgt etwa $r_{max} = 20$ km. Selbst unter Annahme einer Reichweite von nur 15 km beträgt die von einem FTTH POP versorgte Fläche rund 450 km², so dass für die Flächendeckung alleine nur etwa $51.123 \text{ km}^2 / 450 \text{ km}^2 \approx 114$ (!) FTTH POP Standorte

erforderlich wären. Aus praktischen Gründen (Handling der Glasfasern) können an einem typischen FTTH POP Standort jedoch nicht beliebig viele Glasfaseranschlüsse terminiert werden. Daher wurden bei der Planung max. 4000 Anschlüsse pro FTTH POP zugelassen.

Für die FTTH POP Standorte wurde eine Klimatisierung angenommen (Stromverbrauch 1,5 kW; Gewicht 30 kg).

- Für die FTTC Versorgung werden 300.000 der 400.000 KVz Standorte mit VDSL2 erschlossen. Hintergrund: Die in Abschnitt „Vergleich Leistungsaufnahme und Gewicht der Systemtechnik“ angenommenen VDSL2 35b Bitraten können über eine maximale Entfernung von etwa 0,3 km realisiert werden. Dies ergibt eine versorgte Fläche von etwa 0,18 km² und erfordert somit 51.123 km² / 0,18 km² ≈ 280.000 KVz Standorte. D.h., die Anzahl der FTTC Standorte ist wesentlich größer als die der FTTH Standorte und im Gegensatz zu letzteren durch die maximale Reichweite der VDSL2 Systeme bestimmt. Für die Berechnungen in diesem Abschnitt wurden 300.000 FTTC Standorte (KVz) angenommen. Weiterhin wurde angenommen, dass die KVz passiv gekühlt werden und somit keine aktive Kühlung der KVz Gehäuse durch Lüfter oder Klimageräte erforderlich ist.
Bemerkung: Da kein Stromverbrauch für die Kühlung der KVz angenommen wurde, ist die tatsächliche Anzahl der KVz Standorte ab einem bestimmten Auslastungsgrad der Netzelemente unerheblich.
- Gleichmäßige Verteilung der Teilnehmer auf die entsprechenden FTTH, FTTB, FTTC bzw. DOCSIS Standorte.
- Bei der FTTB Planung wurden Gebäude mit jeweils 16 Haushalten angenommen, was für FTTB eine best case Betrachtung darstellt. Unten werden aber auch Ergebnisse für realistischere Planungen vorgestellt.
- In Deutschland haben rund 25 Mio. Haushalte Zugang zu DOCSIS-Netzen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde aber der Stromverbrauch für DOCSIS auf eine Vollversorgung aller 40 Mio. Haushalte hochgerechnet. Für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s sind hierfür 104.781 bzw. 1.042.299 Cluster erforderlich.

Alle weiteren Annahmen entsprechen denen in Abschnitt „Vergleich Leistungsaufnahme und Gewicht der Systemtechnik“. Die Ergebnisse der Berechnung werden für verschiedene Auslastungsgrade (siehe Tabelle 4) in Abbildung 8 bis Abbildung 13 dargestellt.

Auslastungsgrad (Anteil homes connected)	10%	50%	90%	100%
Teilnehmer pro FTTH POP	400	2000	3600	4000
Teilnehmer pro KVz	13	67	120	133
Teilnehmer pro G.fast DPU	2	8	14	16
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s Cluster	38	139	340	378
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s Cluster	4	19	34	38

TABELLE 4: ANGENOMMENE AUSLASTUNGSGRAD UND TEILNEHMER PRO FTTH POP, KVZ, G.FAST DPU BZW. DOCSIS CLUSTER.

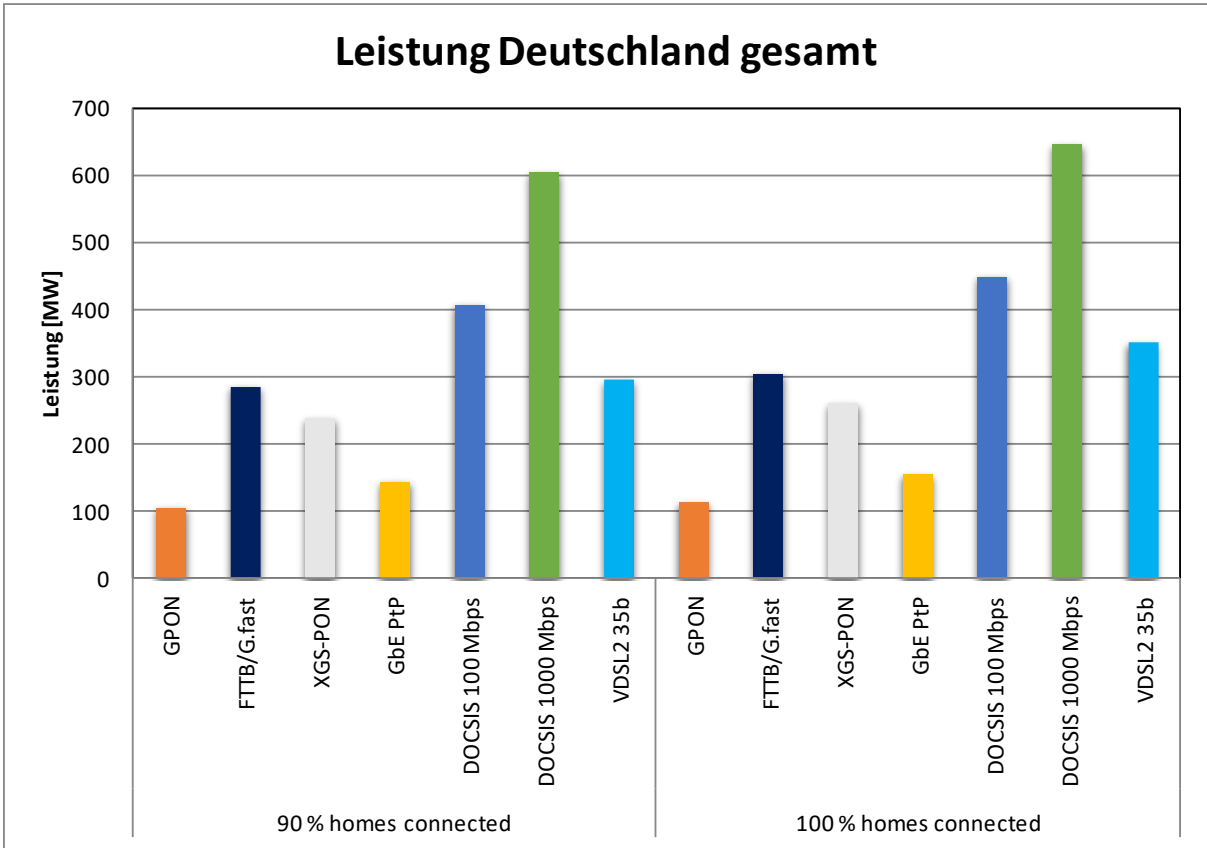
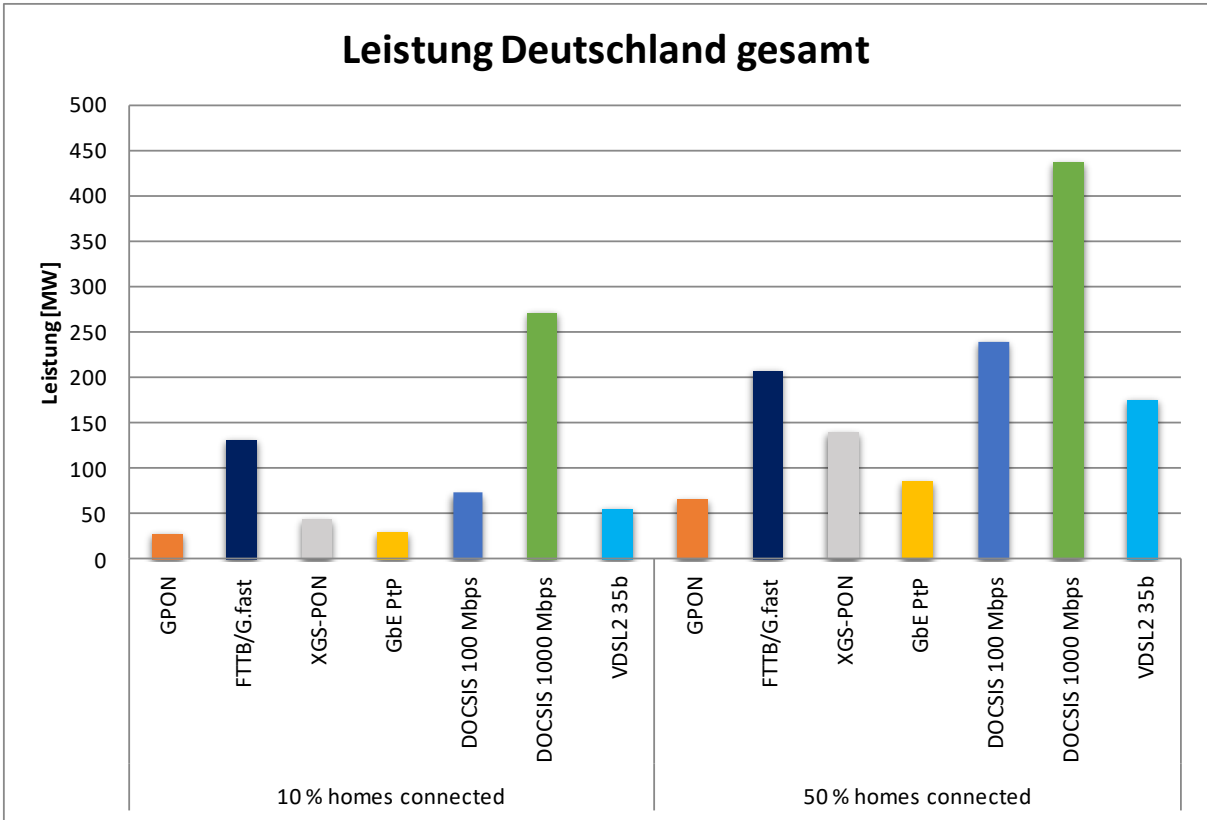


ABBILDUNG 10: LEISTUNGS-AUFNAHME FÜR EINE GESAMTVERSORGUNG VON DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

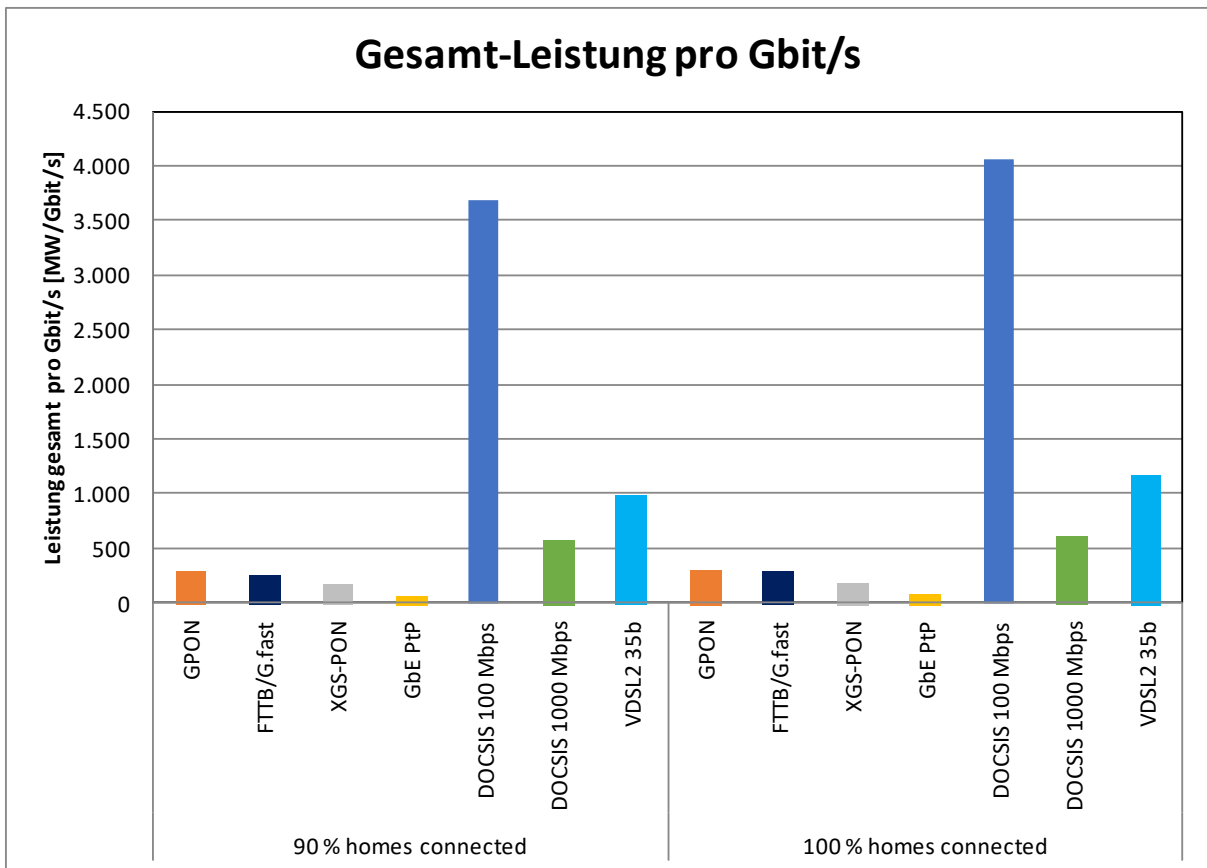
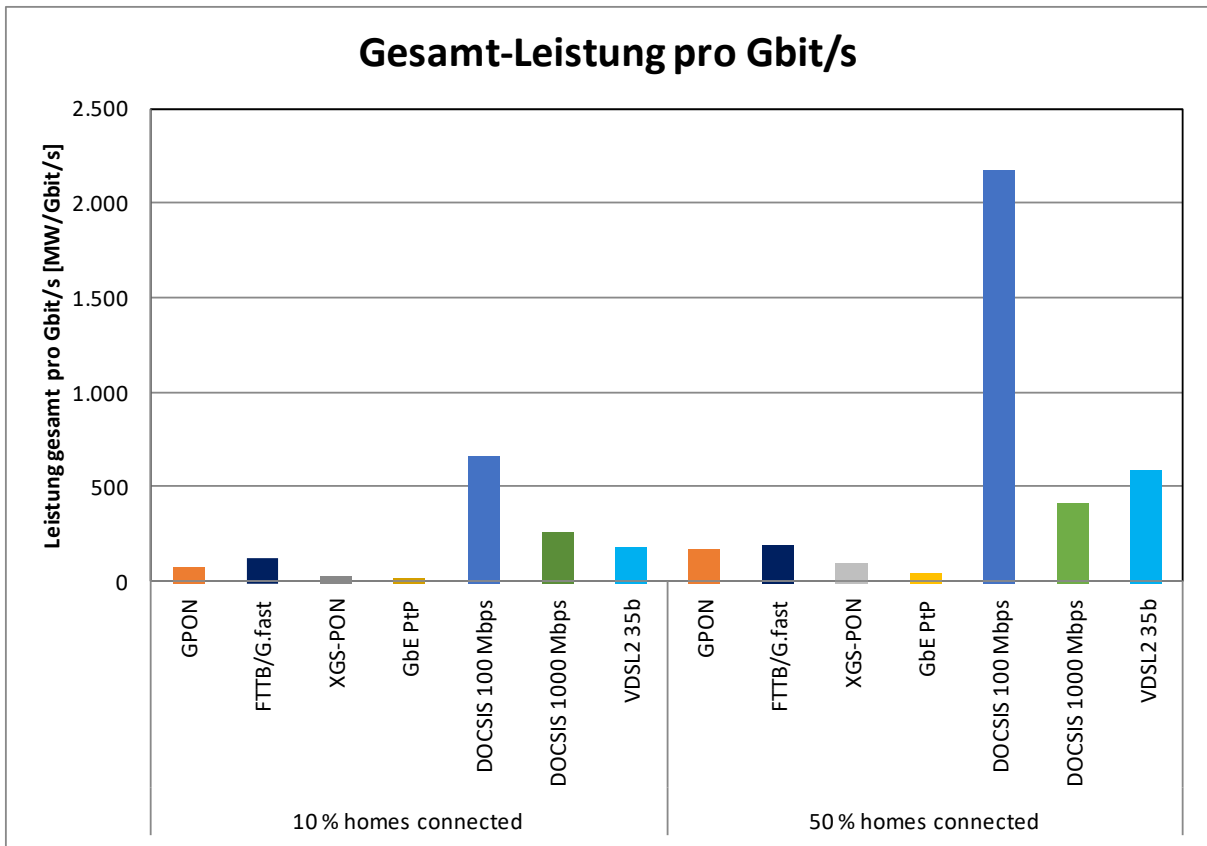


ABBILDUNG 11: LEISTUNGS-AUFNAHME PRO GBIT/S FÜR EINE GESAMTVERSORGUNG VON DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

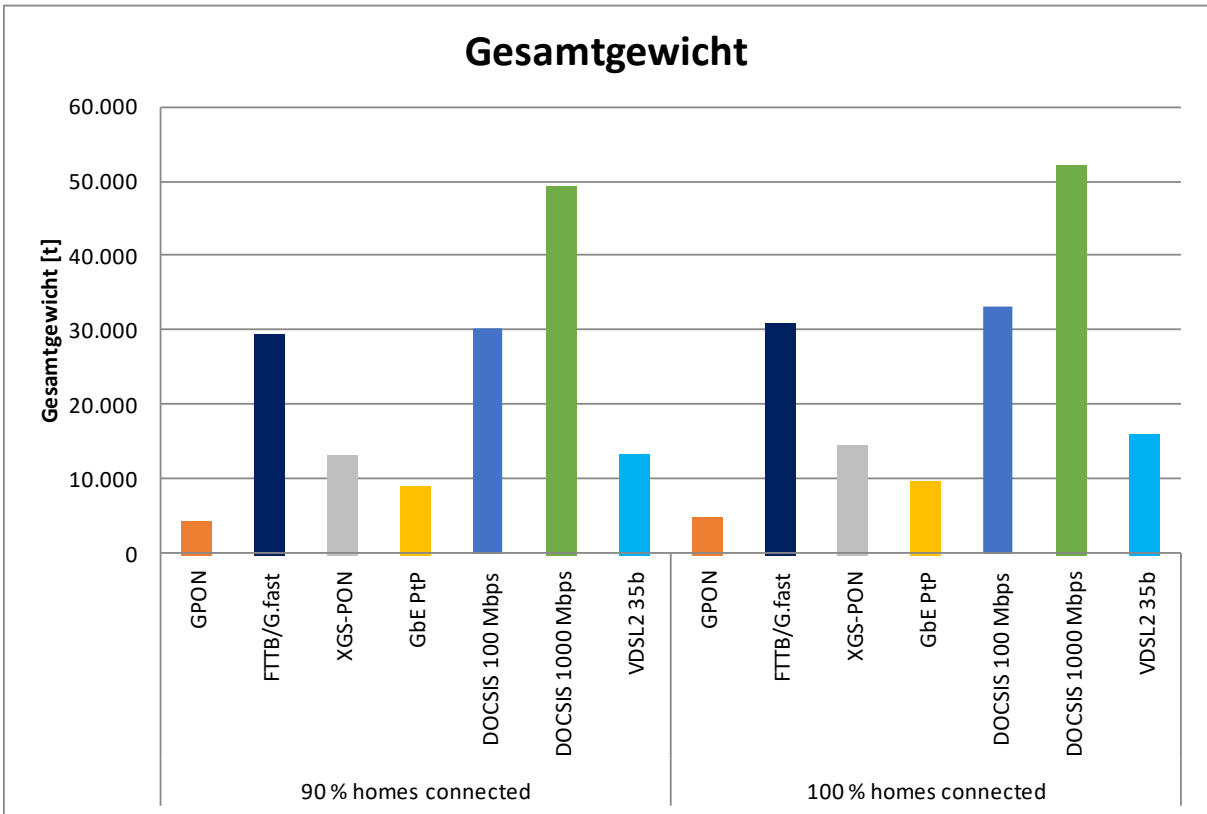
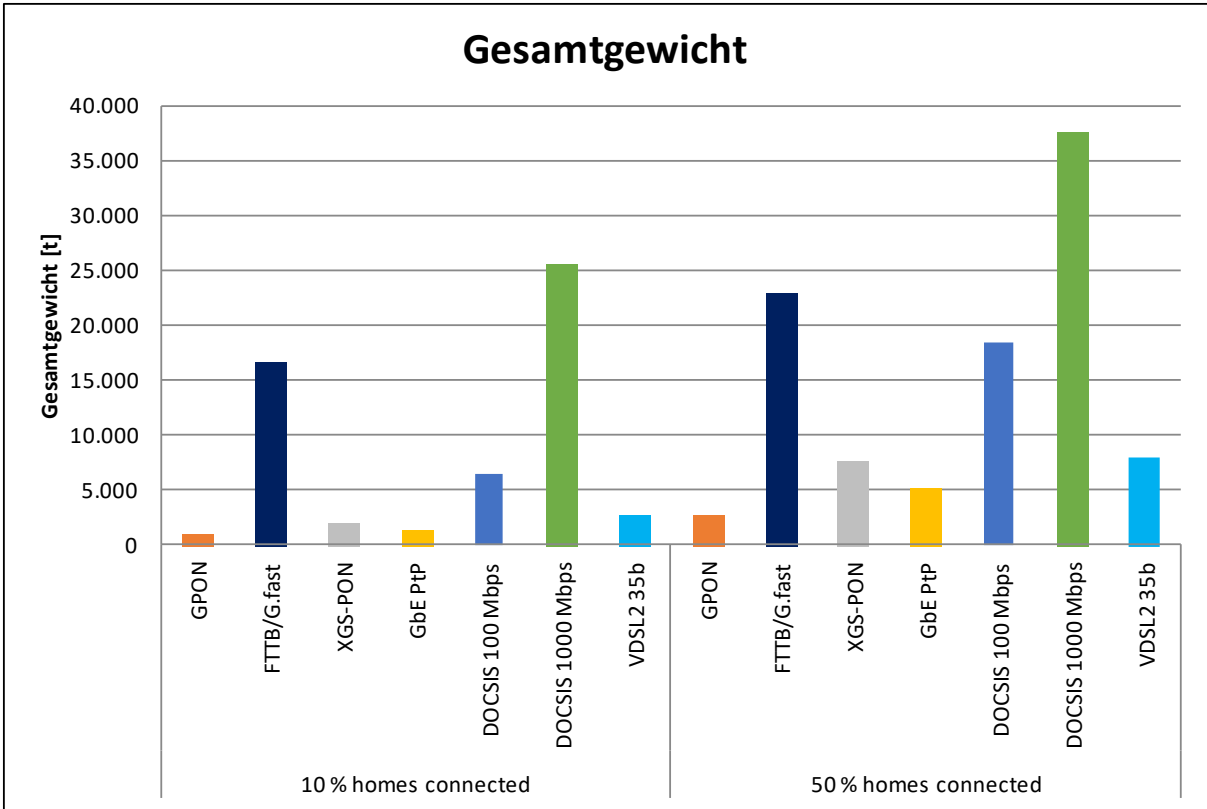


ABBILDUNG 12: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT FÜR EINE GESAMTVERSORGUNG VON DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

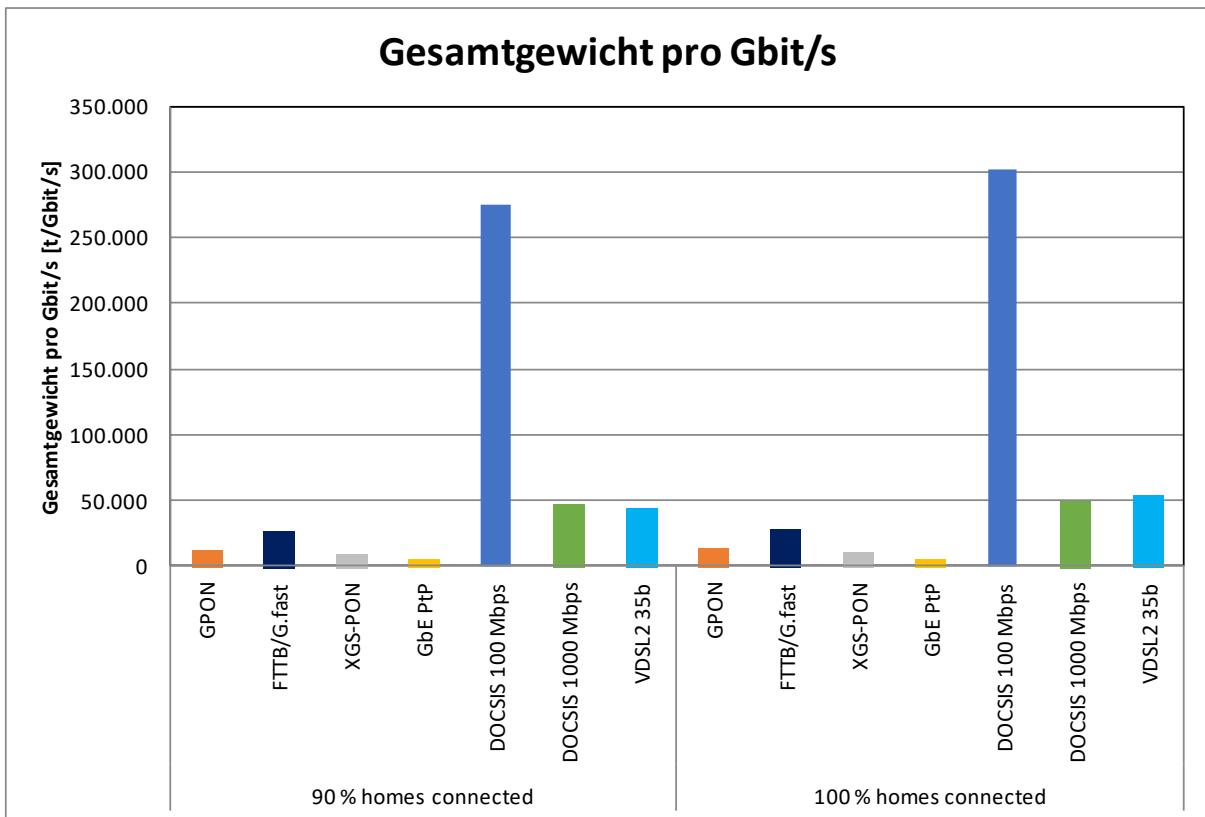
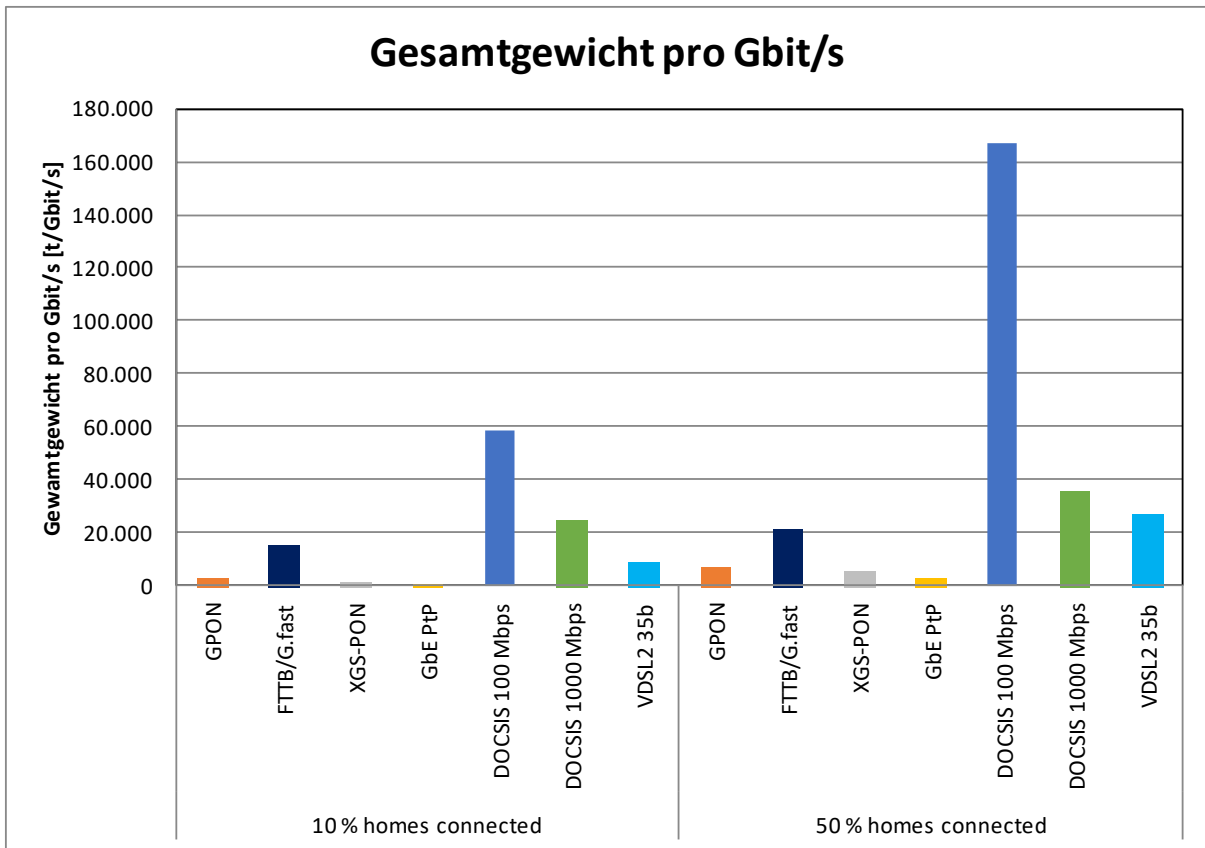


ABBILDUNG 13: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT PRO GBIT/S FÜR EINE GESAMTVERSORGUNG VON DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

Aus Abbildung 8 kann man erkennen, dass die Leistungsaufnahme für alle FTTH Technologien (GPON, GbE

Punkt-zu-Punkt und XGS-PON) und alle Auslastungsgrade (Anteil homes connected) stets deutlich geringer als für die elektrischen Technologien (DOCSIS und VDSL2) sowie FTTB/G.fast ist. FTTB liegt dabei (ab einem Auslastungsgrad von 50 %) zwischen den optischen und den elektrischen Zugangstechnologien. Insbesondere für FTTB aber auch für DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s sind kleine Auslastungsgrade ungünstig. Dies liegt an den vergleichsweise vielen Netzknoten, die für diese Technologien erforderlich sind, und die bei geringen Auslastungen zu einer relativ hohen Leistungsaufnahme pro Teilnehmer führen. In Bezug auf FTTB sei noch einmal darauf hingewiesen, dass hier eine best-case Betrachtung durchgeführt wurde. Mit einer realistischen Berechnung, bei der die reale Verteilung der Haushalte auf die Wohngebäude in Deutschland berücksichtigt wird kommt man bei einer 100 % FTTB Versorgung zu einer vergleichbaren Leistungsaufnahme wie bei FTTC. Bei einer 100 % Versorgung kann man mit GPON etwa 530 MW gegenüber der Technologie mit der höchsten Leistungsaufnahme (DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s) einsparen.

Noch drastischer fallen die Unterschiede auf, wenn man den Gesamtstromverbrauch auf die Summenbitrate bezieht (vgl. Abbildung 11). Auf ein Gbit/s bezogen ergibt sich der geringste Stromverbrauch für GbE Punkt-zu-Punkt, gefolgt von XGS-PON und GPON. Bei einem Auslastungsgrad von 90 % oder mehr ergeben sich für FTTB sogar geringere Werte als für GPON, nicht aber als für GbE Punkt-zu-Punkt bzw. XGS-PON. Der mit Abstand höchste Wert ergibt sich aufgrund der höchsten absoluten Leistungsaufnahme und der geringsten Summenbitrate für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s. Ab einem Auslastungsgrad von 50 % ergeben sich für DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s geringere Werte als für VDSL2 35b. Bei einer 100 % Versorgung kann man mit GbE Punkt-zu-Punkt pro Gbit/s Summenbitrate fast 4000 MW, mit XGS-PON fast 3900 MW und mit GPON über 3750 MW gegenüber DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s einsparen.

In Bezug auf das Gesamtgewicht und das Gewicht pro Gbit/s ergibt sich ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13). Bei einer 100 % Versorgung ist das Gesamtgewicht der GPON Systemtechnik inkl. NT um mehr als 28.400 t, das der GbE Punkt-zu-Punkt Technik um mehr als 23.400 t und das der XGS-PON Technik um etwa 18.600 t geringer als das für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s. Das Gesamtgewicht pro Gbit/s ist bei einer 100 % Versorgung für GbE Punkt-zu-Punkt um fast 297.000 t, für XGS-PON um über 292.000 t und für GPON um fast 289.000 t geringer als das für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s.

Anmerkung: das vergleichsweise hohe Gesamtgewicht bei DOCSIS Netzen liegt in der Tatsache begründet, dass es sich hierbei überwiegend um analoge Technik handelt, die ein höheres Gewicht aufweist als digitale Technologien.

Fazit deutschlandweite Planung: FTTH Technologien benötigen für alle betrachteten Auslastungsgrade (Anteil homes connected) signifikant weniger elektrische Leistung und Gewicht für die Systemtechnik inkl. NT beim Teilnehmer als die elektrischen Technologien VDSL2, und DOCSIS sowie FTTB. Wenn die absoluten Zahlen (Stromverbrauch, Gewicht) betrachtet werden, ist GPON die günstigste FTTH Variante gefolgt von GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON. DOCSIS3.1 hingegen ist die Technologie mit der höchsten Leistungsaufnahme. Mit einer best-case Berechnung liegt FTTB bzgl. der absoluten Leistungsaufnahme zwischen den optischen und den elektrischen Technologien. Bezieht man hingegen den Stromverbrauch und das Gewicht auf die Bitrate, so sind GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON die günstigsten FTTH Technologien. DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s ist die Zugangsvariante mit dem mit Abstand höchsten Stromverbrauch bzw. Gesamtgewicht pro Gbit/s.

Städtische Gebiete

Städtische Gebiete sind gekennzeichnet durch eine Einwohnerdichte von mehr als 500 Einwohnern pro km². Gemäß [17] leben in Deutschland 54,9 Mio. Einwohner in städtischen Gebieten mit einer Gesamtfläche von 72.589 km², entsprechend einer Einwohnerdichte von 756 Einwohnern pro km². Im Folgenden soll die Leistungsaufnahme und das Gewicht der jeweiligen Zugangstechnologien für städtische Gebiete in Deutschland unter folgenden Annahmen abgeschätzt werden:

- 27,45 Mio. Teilnehmer (Haushalte) in städtischen Gebieten, d.h. 2 Einwohner pro Haushalt.
- Ein FTTH POP Standort kann aus praktischen Gründen (Handling der Glasfasern) maximal 4000 Glasfaseranschlüsse terminieren. Daher sind für die Versorgung der städtischen Gebiete 6863 FTTH POP Standorte erforderlich.
- Für die FTTH POP Standorte wurde eine Klimatisierung angenommen (Stromverbrauch 1,5 kW; Gewicht 30 kg).
- 150.000 FTTC Standorte (KVz). Dabei wurde angenommen, dass keine aktive Kühlung der KVz Gehäuse durch Lüfter oder Klimageräte erforderlich ist.
- Bei der FTTB Planung wurden Gebäude mit jeweils 16 Haushalten angenommen.
- Bei DOCSIS wurde eine Vollversorgung aller Haushalte angenommen. Für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s sind hierfür 72.623 bzw. 722.407 Cluster erforderlich.
- Gleichmäßige Verteilung der Teilnehmer auf die FTTH, FTTB, DOCSIS bzw. FTTC Standorte.

Alle weiteren Annahmen entsprechen denen in Abschnitt „Vergleich Leistungsaufnahme und Gewicht der Systemtechnik“. Die Ergebnisse werden für verschiedene Auslastungsgrade (siehe Tabelle 5) in Abbildung 14 bis Abbildung 17 dargestellt.

Auslastungsgrad (Anteil homes connected)	10%	50%	100%
Teilnehmer pro FTTH POP	400	2000	4000
Teilnehmer pro KVz	18	92	183
Teilnehmer pro G.fast DPU	2	8	16
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s Cluster	38	139	378
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s Cluster	4	19	38

TABELLE 5: ANGENOMMENE AUSLASTUNGSGRAD UND TEILNEHMER PRO FTTH POP, KVZ, G.FAST DPU BZW. DOCSIS CLUSTER.

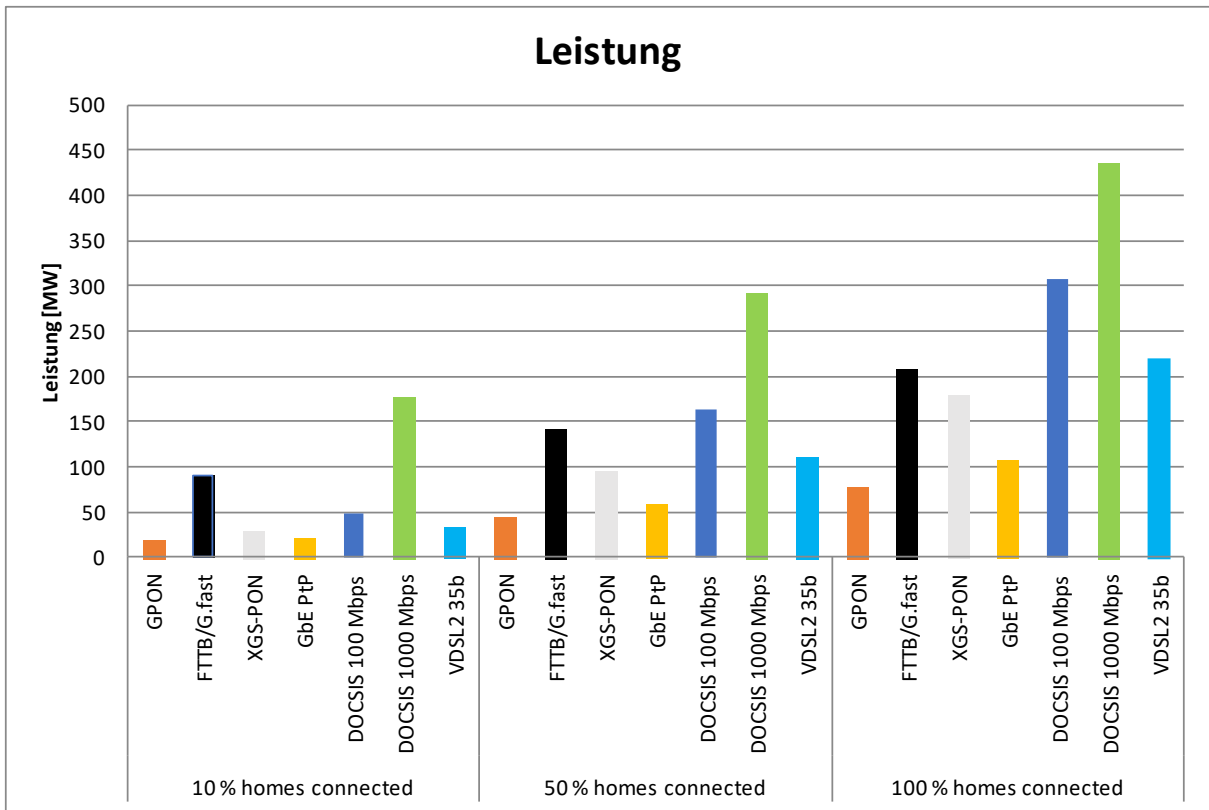


ABBILDUNG 14: LEISTUNGS-AUFNAHME FÜR EINE VERSORGUNG DER STÄDTISCHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

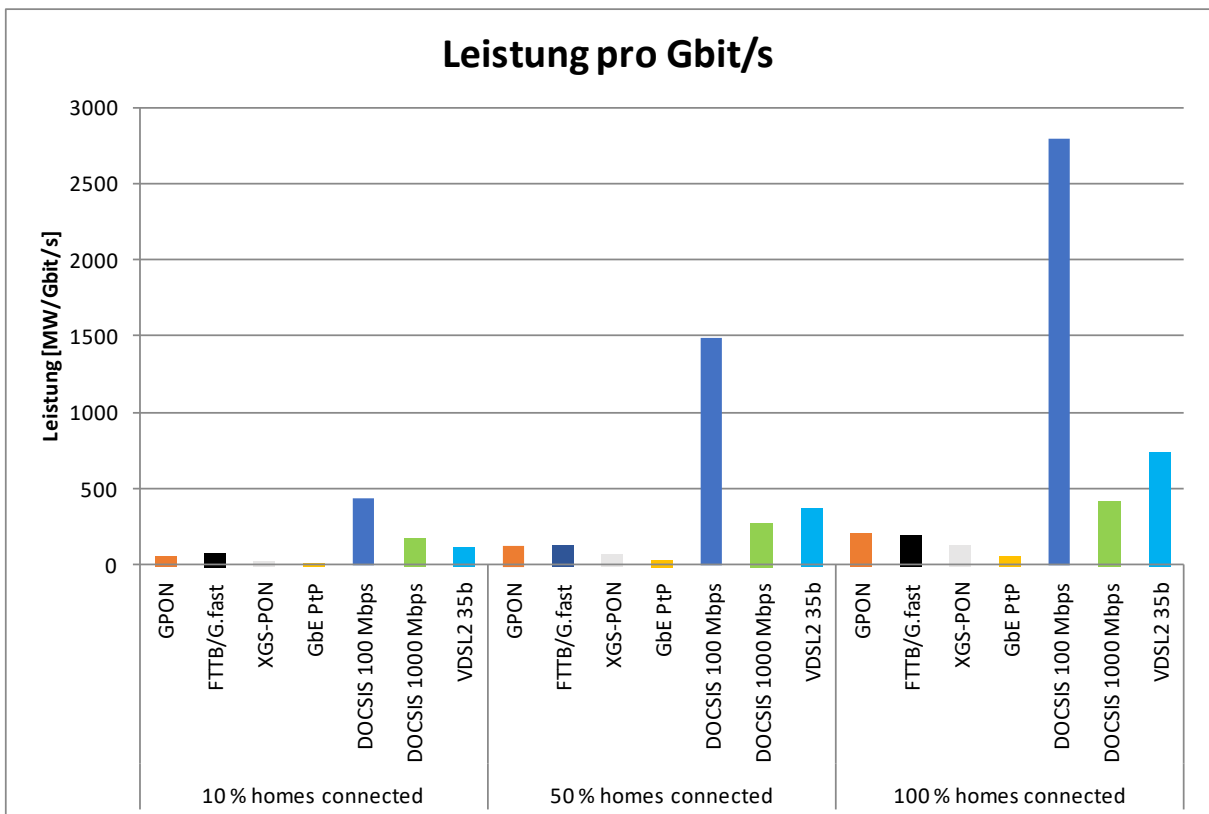


ABBILDUNG 15: LEISTUNGS-AUFNAHME PRO GBIT/S FÜR EINE VERSORGUNG DER STÄDTISCHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

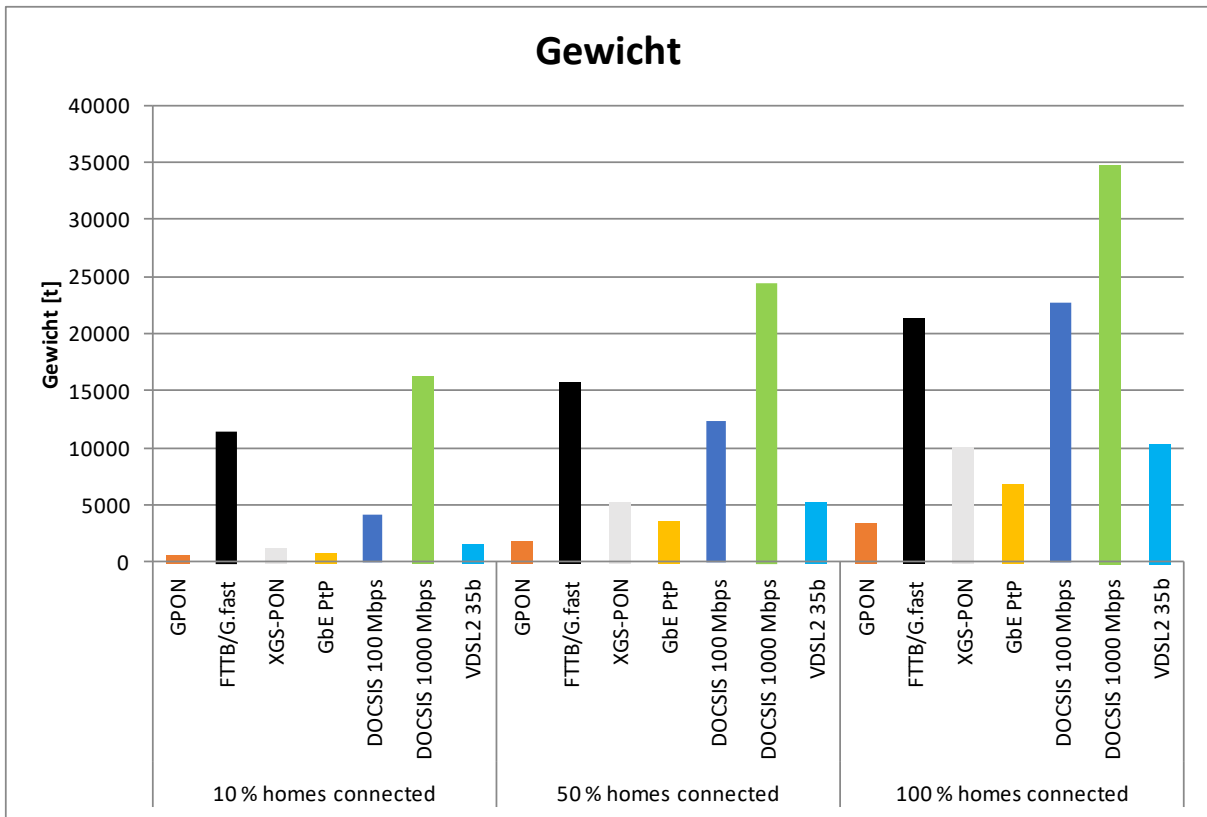


ABBILDUNG 16: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT FÜR EINE VERSORGUNG DER STÄDTISCHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

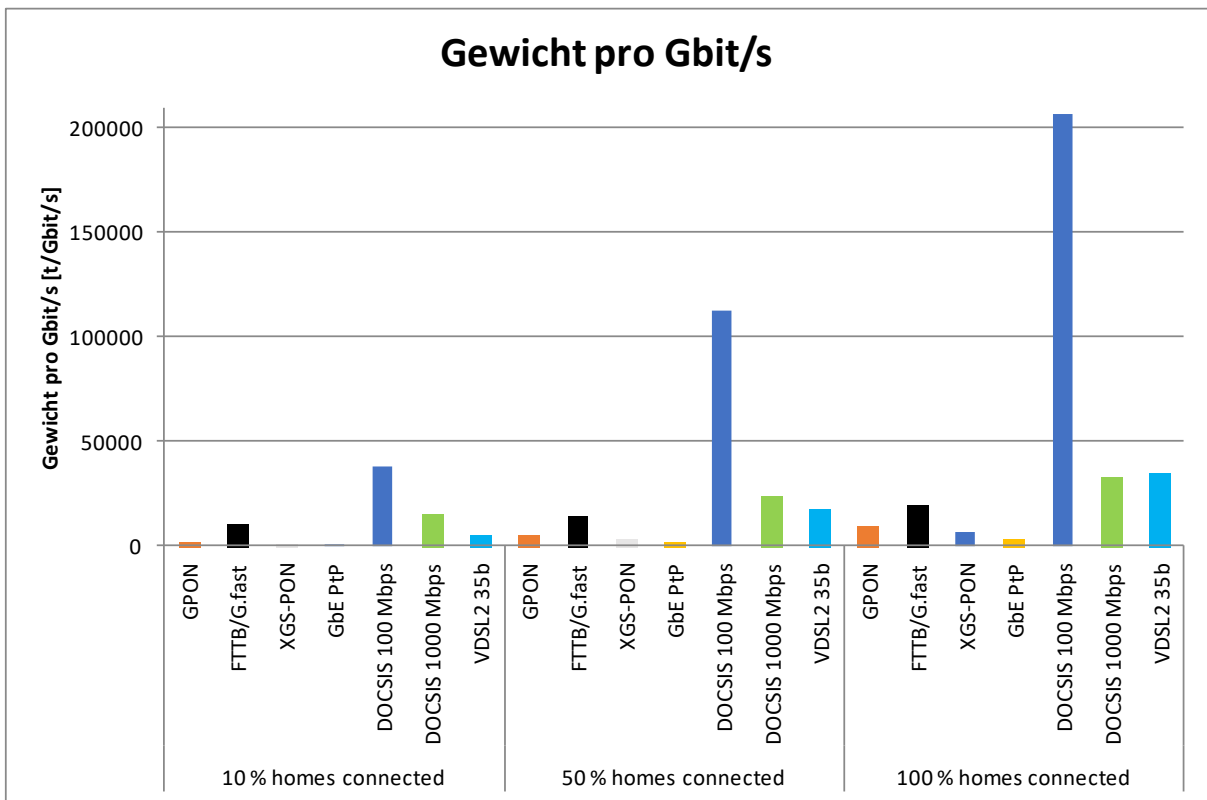


ABBILDUNG 17: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT PRO GBIT/S FÜR EINE VERSORGUNG DER STÄDTISCHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

Aus Abbildung 14 kann man erkennen, dass auch in städtischen Gebieten die Leistungsaufnahme für die elektrischen Technologien DOCSIS und FTTC sowie FTTB für alle Auslastungsgrade stets größer als der für FTTH ist. Der geringste Stromverbrauch ergibt sich wieder für GPON, gefolgt von GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON. Bei einem Auslastungsgrad von 100 % kann man mit GPON fast 360 MW, mit GbE Punkt-zu-Punkt über 330 MW und mit XGS PON fast 256 MW gegenüber DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s einsparen.

Auf ein Gbit/s bezogen ergibt sich der geringste Stromverbrauch wieder für GbE Punkt-zu-Punkt, gefolgt von XGS-PON, FTTB und GPON (siehe Abbildung 13). Bei einer 100 % Versorgung kann man mit GbE Punkt-zu-Punkt pro Gbit/s Summenbitrate über 2740 MW und mit XGS-PON fast 2680 MW gegenüber DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s einsparen.

Fazit Planung städtische Gebiete: FTTH Technologien benötigen auch in städtischen Gebieten für alle betrachteten Auslastungsgrade (Anteil homes connected) weniger elektrische Leistung und Gewicht für die Systemtechnik inkl. NT beim Teilnehmer als DOCSIS, FTTC und FTTB. Wenn die absoluten Zahlen (Stromverbrauch, Gewicht) betrachtet werden, ist wie schon bei der deutschlandweiten Planung GPON die günstigste FTTH Variante gefolgt von GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON. Bezieht man hingegen den Stromverbrauch und das Gewicht auf die Bitrate, so sind auch hier GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON die günstigsten FTTH Technologien.

Ländliche Gebiete

Ländliche Gebiete sind gekennzeichnet durch eine Einwohnerdichte von weniger als 100 Einwohnern pro km². Gemäß [17] leben in Deutschland 14,9 Mio. Einwohner in ländlichen Gebieten mit einer Gesamtfläche von 21.6694,7 km², entsprechend einer Einwohnerdichte von 69 Einwohnern pro km². Im Folgenden soll die Leistungsaufnahme und das Gewicht der jeweiligen Zugangstechnologien für ländliche Gebiete in Deutschland unter folgenden Annahmen abgeschätzt werden:

- 5,9 Mio. Teilnehmer (Haushalte) in ländlichen Gebieten (d.h. 2,5 Einwohner pro Haushalt).
- Ein FTTH POP Standort kann aus praktischen Gründen (Handling der Glasfasern) maximal 2000 Glasfaseranschlüsse terminieren. Daher sind für die Versorgung der ländlichen Gebiete 2975 FTTH POP Standorte erforderlich.
Für die FTTH POP Standorte wurde eine passive Kühlung angenommen.
- 100.000 FTTC Standorte. Es wurde wieder angenommen, dass keine aktive Kühlung der KVz Gehäuse durch Lüfter oder Klimageräte erforderlich ist.
- Aufgrund der vergleichsweise vielen Ein- und Zweifamilienhäusern in ländlichen Gebieten wurde auf eine FTTB Planung in ländlichen Gebieten verzichtet.
- Bei DOCSIS wurde eine Vollversorgung aller Haushalte angenommen. Für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s sind hierfür 15.742 bzw. 156.594 Cluster erforderlich.
- Gleichmäßige Verteilung der Teilnehmer auf die FTTH, FTTC bzw. DOCSIS Standorte.

Alle weiteren Annahmen entsprechen denen in Abschnitt „Vergleich Leistungsaufnahme und Gewicht der Systemtechnik“. Die Ergebnisse werden wieder für verschiedene Auslastungsgrade (siehe Tabelle 6) bestimmt und sind in Abbildung 18 bis Abbildung 21 dargestellt.

Auslastungsgrad (Anteil homes connected)	10%	50%	100%
Teilnehmer pro FTTH POP	200	1000	2000

Teilnehmer pro KVz	6	30	60
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s Cluster	38	139	378
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s Cluster	4	19	38

TABELLE 6: ANGENOMMENE AUSLASTUNGSGRAD E UND TEILNEHMER PRO FTTH POP, KVZ BZW. DOCSIS CLUSTER.

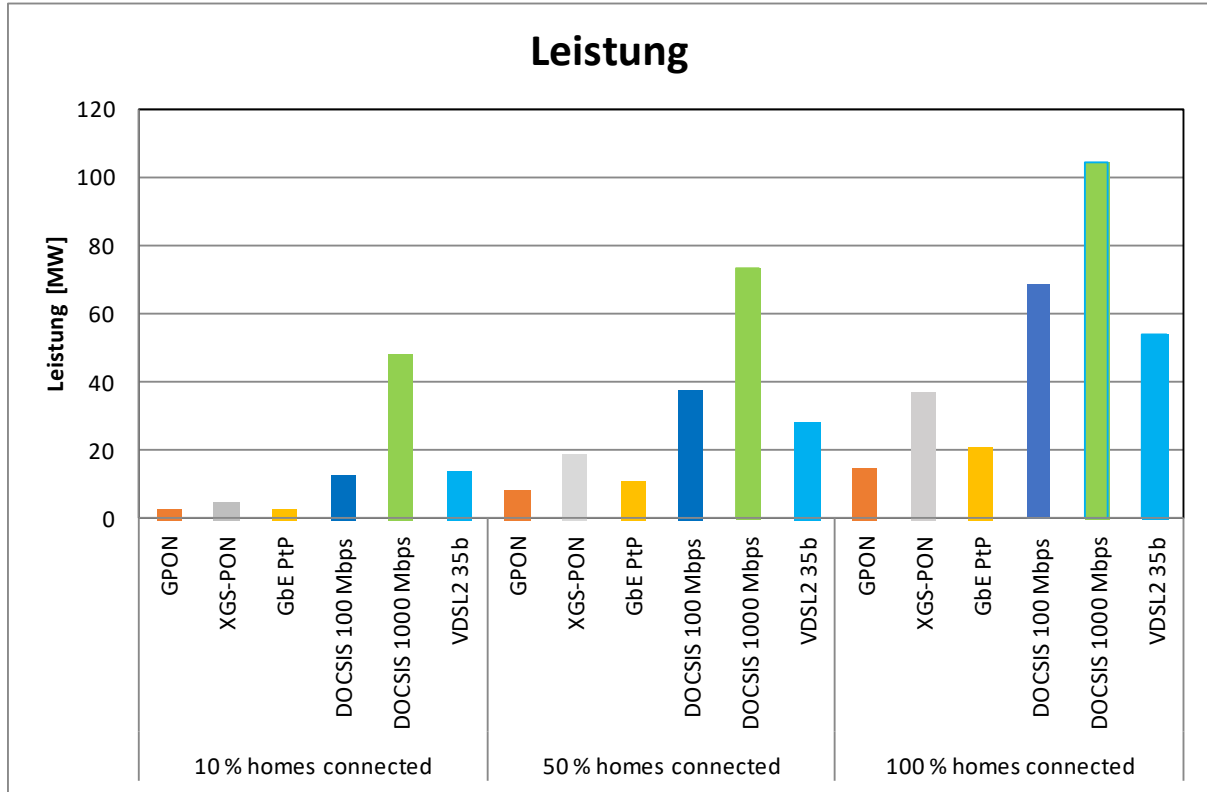


ABBILDUNG 18: LEISTUNGS-AUFNAHME FÜR EINE VERSORGUNG DER LÄNDLICHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD E (ANTEIL HOMES CONNECTED).

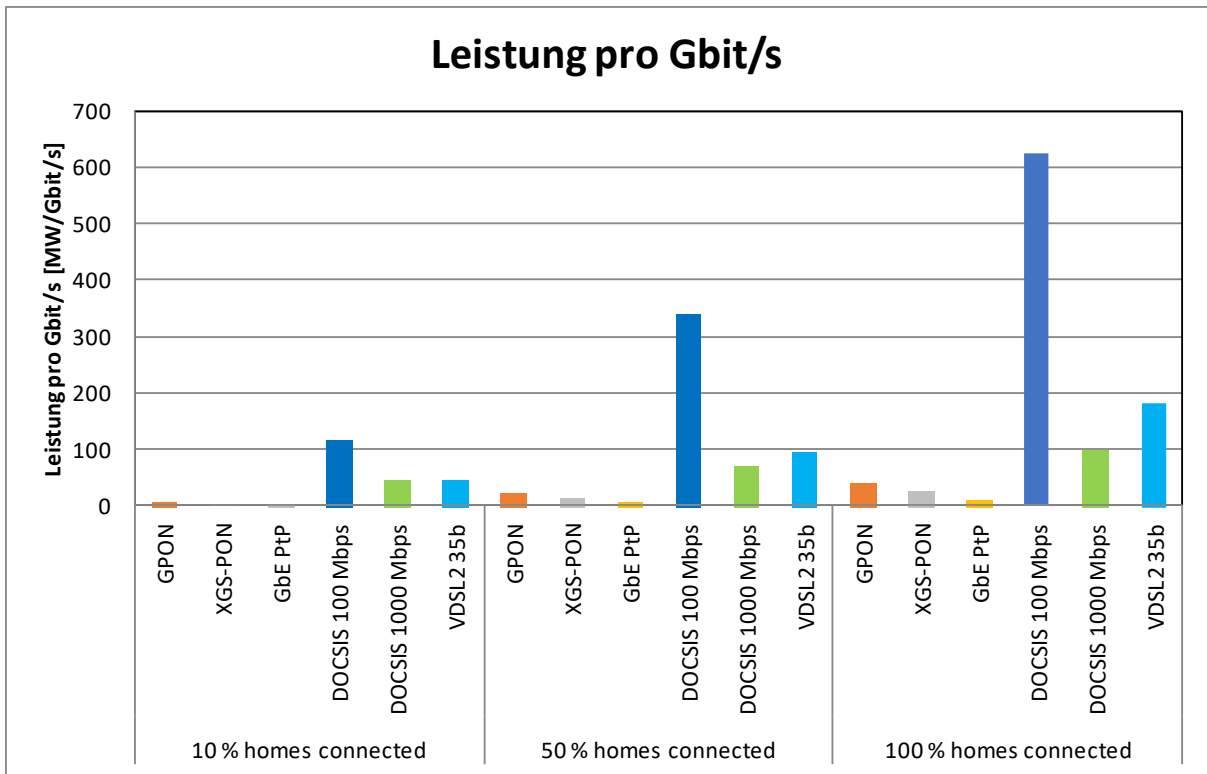


ABBILDUNG 19: LEISTUNGS-AUFNAHME PRO Gbit/s FÜR EINE VERSORGUNG DER LÄNDLICHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

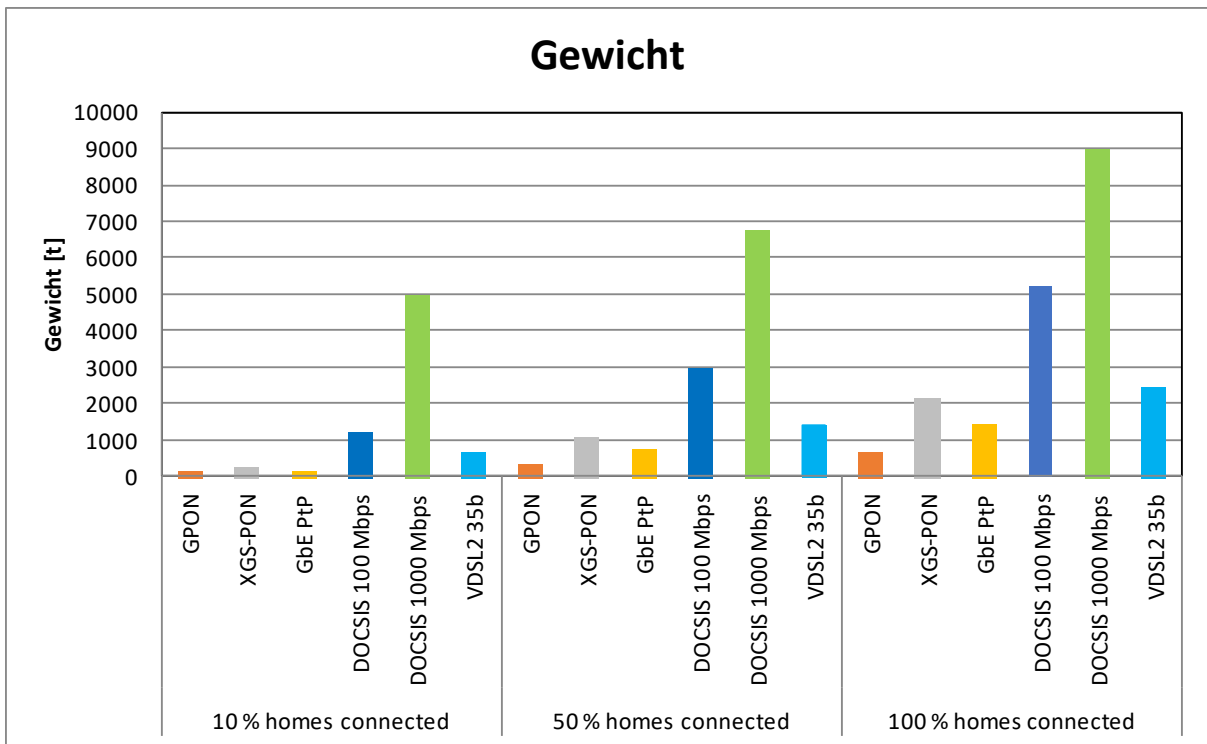


ABBILDUNG 20: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT FÜR EINE VERSORGUNG DER LÄNDLICHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

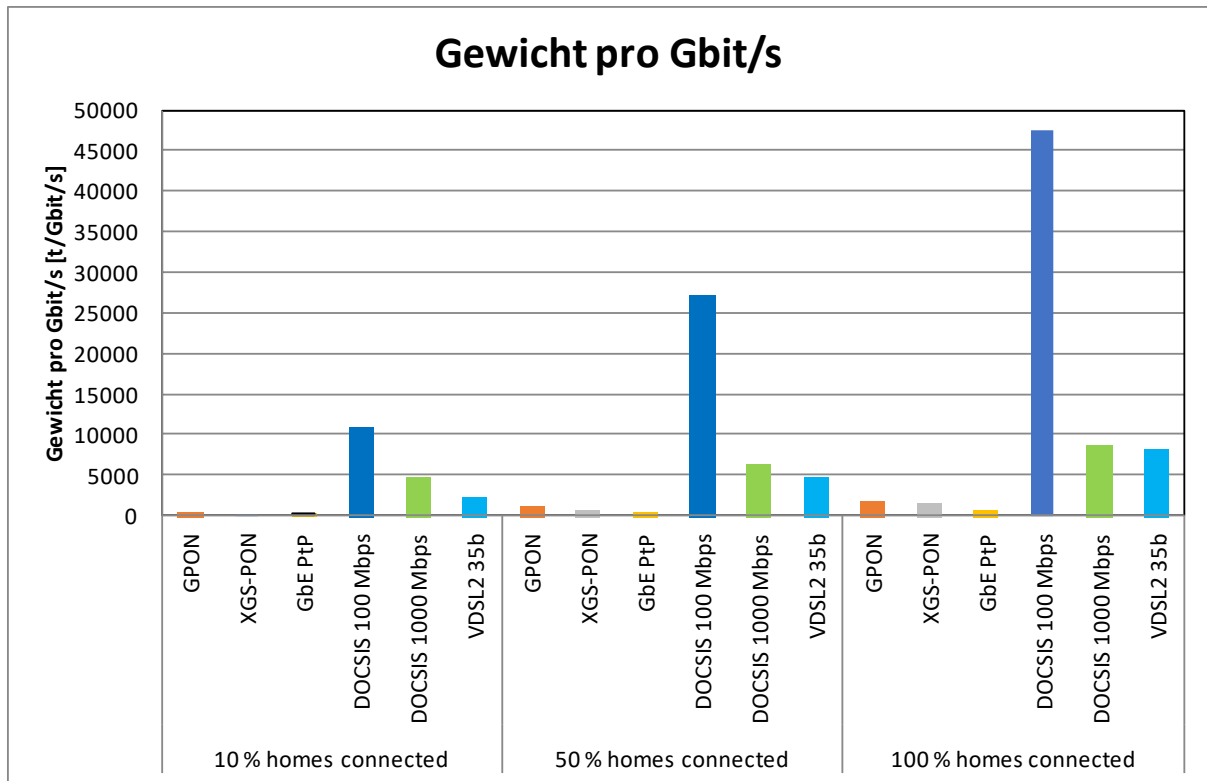


ABBILDUNG 21: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT PRO GBIT/S FÜR VERSORGUNG DER LÄNDLICHEN GEBIETE IN DEUTSCHLAND MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

Gemäß Abbildung 18 ist auch in ländlichen Gebieten die Leistungsaufnahme der elektrischen Technologien FTTC bzw. DOCSIS für alle Auslastungsgrade stets größer als für FTTH, wobei der Unterschied im Vergleich zu städtischen Gebieten deutlich stärker ausgeprägt ist. Gründe hierfür sind zum einen der relativ geringe Auslastungsgrad der FTTC Standorte und zum anderen die Annahme, dass für FTTH Standorte in ländlichen Gebieten (im Gegensatz zu städtischen Gebieten) eine passive Kühlung ausreichend ist, so dass hier kein Stromverbrauch für Klimatechnik berücksichtigt werden muss. Der geringste Stromverbrauch ergibt sich auch hier für GPON, gefolgt von XGS-PON und GbE Punkt-zu-Punkt. Bei einer 100 % Versorgung kann man mit GPON fast 90 MW, mit GbE Punkt-zu-Punkt über 83 MW und mit XGS PON über 67 MW gegenüber DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s einsparen.

Auf ein Gbit/s bezogen ergibt sich die geringste Leistungsaufnahme wieder für GbE Punkt-zu-Punkt, gefolgt von XGS-PON und GPON (siehe Abbildung 19). Die mit Abstand höchste Leistungsaufnahme weist DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s auf. Bei einer 100 % Versorgung kann man mit GbE Punkt-zu-Punkt pro Gbit/s Summenbitrate über 613 MW, mit XGS-PON fast 600 MW und mit GPON rund 585 MW gegenüber DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s einsparen.

Fazit Planung ländliche Gebiete: FTTH Technologien benötigen auch in ländlichen Gebieten für alle betrachteten Auslastungsgrade (Anteil homes connected) weniger elektrische Leistung und Gewicht für die Systemtechnik inkl. NT beim Teilnehmer als elektrische Zugangstechnologien, wobei die Unterschiede deutlich größer als in städtischen Gebieten ausfallen. Wenn die absoluten Zahlen (Stromverbrauch, Gewicht) betrachtet werden, ist wie schon bei der deutschlandweiten bzw. städtischen Planung GPON die günstigste FTTH Variante gefolgt von GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON. Bezieht man hingegen den Stromverbrauch und das Gewicht auf die Bitrate, so sind auch in ländlichen Gebieten GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON die günstigeren FTTH Technologien.

Beispiel für halbstädtische Gebiete: Haltern am See

Haltern am See ist eine Stadt im Norden des Kreises Recklinghausen im Regierungsbezirk Münster in Nordrhein-Westfalen und ein Beispiel für ein halbstädtisches Gebiet. In Haltern leben 38.013 Einwohner auf einer Fläche von 159 km², entsprechend einer Einwohnerdichte von 239 Einwohnern pro km². Im Folgenden soll der Stromverbrauch und das Gewicht der jeweiligen Zugangstechnologien für Haltern am See unter folgenden Annahmen abgeschätzt werden:

- 17.384 Teilnehmer (Haushalte), d.h. 2,2 Einwohner pro Haushalt. Hiervon werden 14.466 durch FTTH bzw. FTTC erschlossen.
- 13 FTTH POPs, die zwischen 394 und 2463 Teilnehmer versorgen. Die Daten sind reale Daten aus einem Produktionsnetz.
Für die FTTH POP Standorte wurde eine passive Kühlung angenommen.
- 83 FTTC Standorte. Es wurde wieder angenommen, dass keine aktive Kühlung der KVz Gehäuse durch Lüfter oder Klimageräte erforderlich ist.
- Bei der FTTB Planung wurden Gebäude mit jeweils 16 Haushalten angenommen.
- Bei DOCSIS wurde eine Vollversorgung aller Haushalte angenommen. Für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s und DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s sind hierfür 38 bzw. 381 Cluster erforderlich.
- Gleichmäßige Verteilung der Teilnehmer auf die FTTC, FTTB und DOCSIS Standorte.

Alle weiteren Annahmen entsprechen denen in Abschnitt „Vergleich Leistungsaufnahme und Gewicht der Systemtechnik“. Die Ergebnisse werden wieder für verschiedene Auslastungsgrade (siehe Tabelle 7) Abbildung 22 bis Abbildung 25 dargestellt.

Auslastungsgrad (Anteil homes connected)	10%	50%	100%
Teilnehmer pro FTTH POP	111	556	1113
Teilnehmer pro KVz	17	87	174
Teilnehmer pro G.fast DPU	2	8	16
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s Cluster	38	139	378
Teilnehmer pro DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s Cluster	4	19	38

TABELLE 7: ANGENOMMENE AUSLASTUNGSGRADU UND TEILNEHMER PRO FTTH POP, KVZ BZW. DOCSIS CLUSTER.

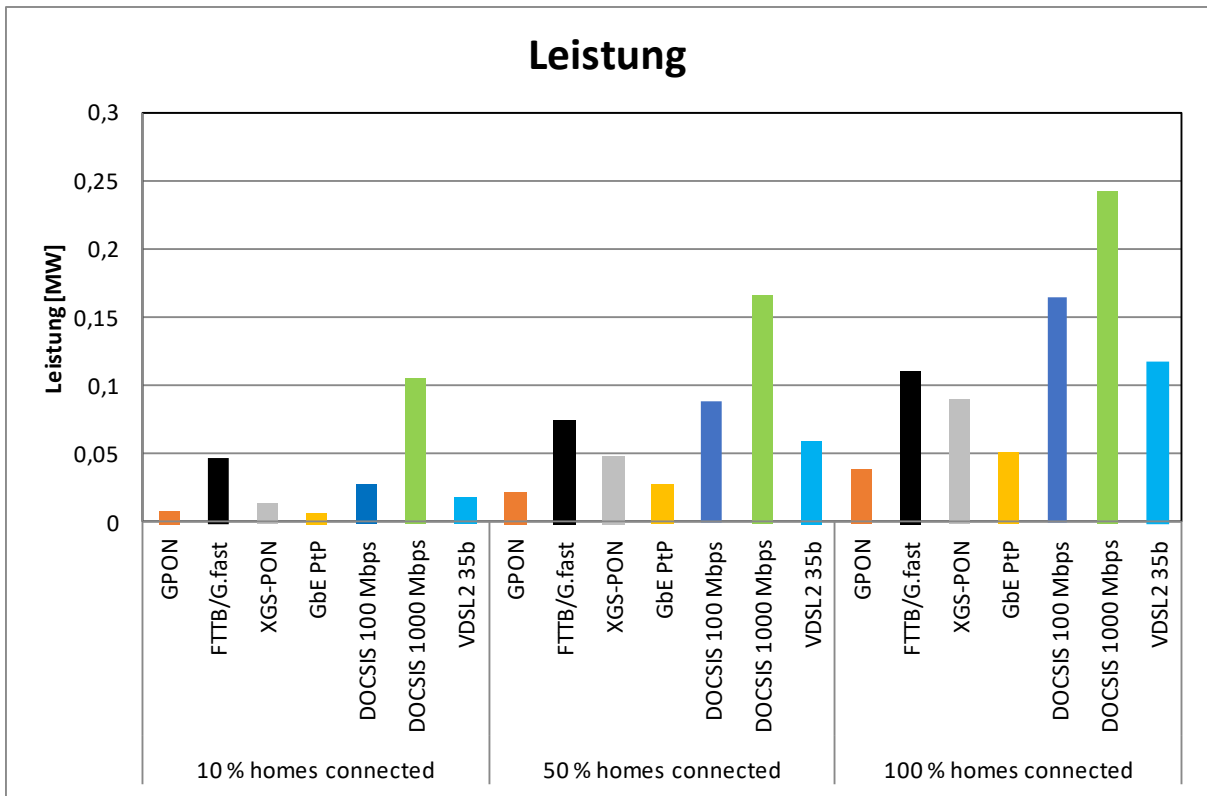


ABBILDUNG 22: LEISTUNGS-AUFNAHME FÜR EINE VERSORGUNG VON HALTERN AM SEE MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

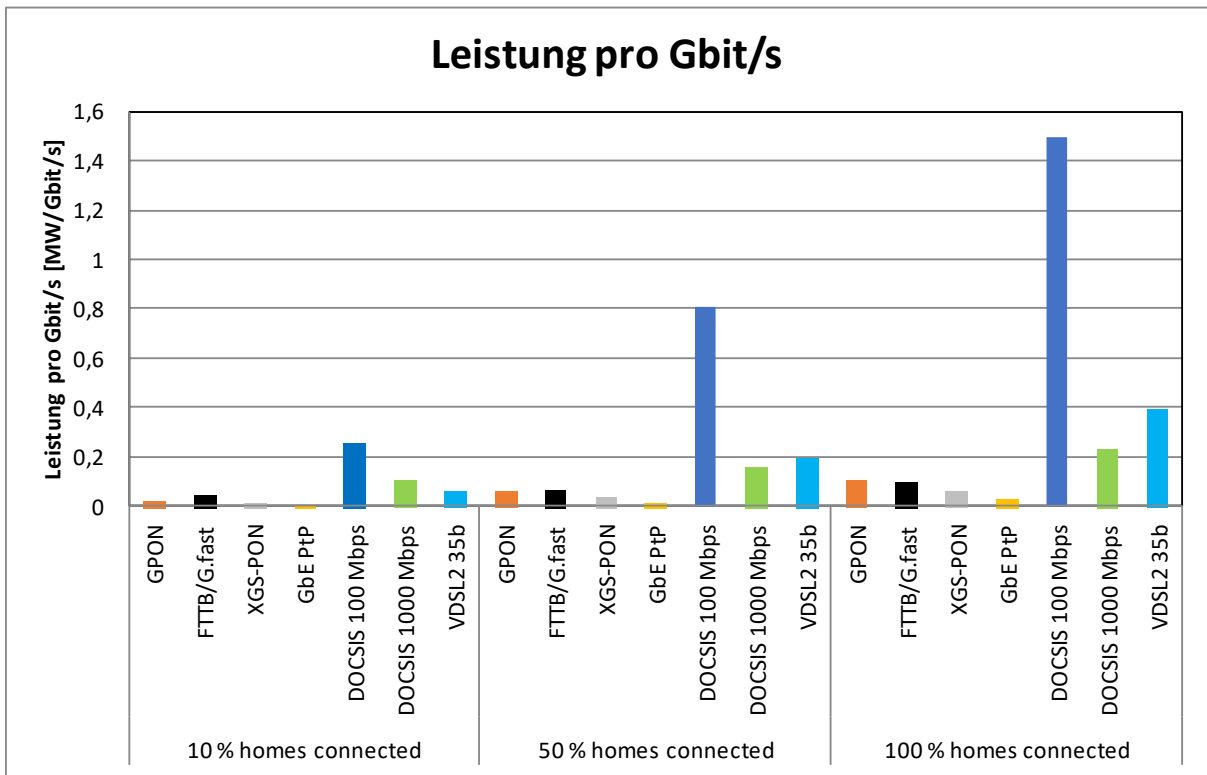


ABBILDUNG 23: LEISTUNGS-AUFNAHME PRO GBIT/S FÜR EINE VERSORGUNG VON HALTERN AM SEE MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

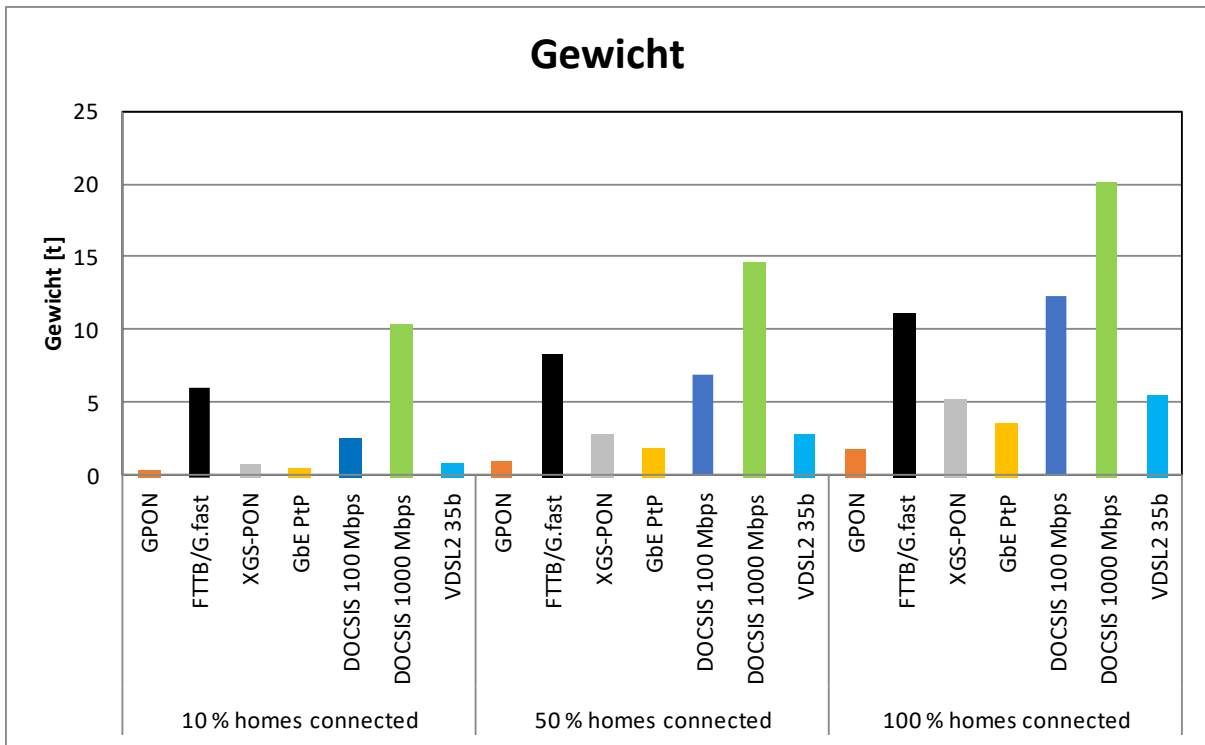


ABBILDUNG 24: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT FÜR EINE VERSORGUNG VON HALTERN AM SEE MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

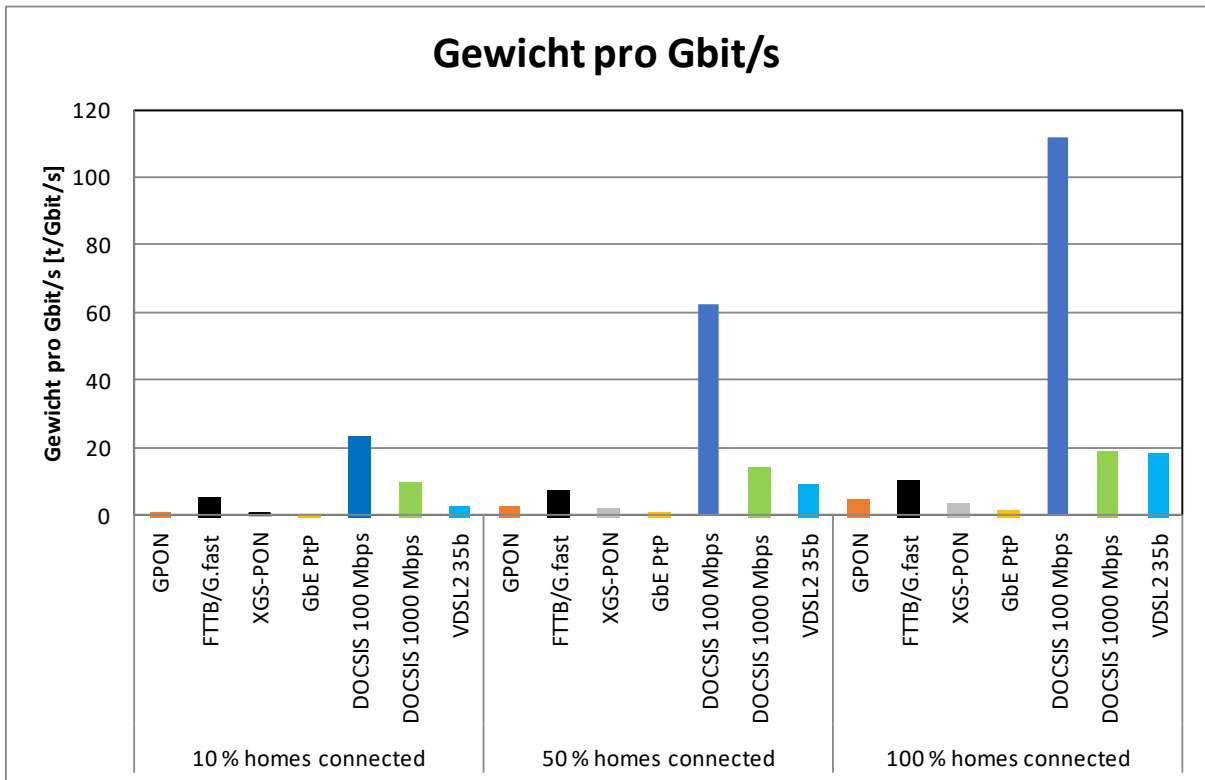


ABBILDUNG 25: GEWICHT DER SYSTEMTECHNIK INKL. NT PRO GBIT/S FÜR VERSORGUNG VON HALTERN AM SEE MIT DER JEWEILIGEN ZUGANGSNETZTECHNOLOGIE FÜR VERSCHIEDENEN AUSLASTUNGSGRAD (ANTEIL HOMES CONNECTED).

Fazit Beispiel für halbstädtische Gebiete: Es wird deutlich, dass sich die Ergebnisse für Haltern am See mit

denen für die deutschlandweite Planung sowie den Ergebnissen und städtischen und ländlichen Gebieten decken. Die gezogenen Schlussfolgerungen sind folglich auch auf reale halbstädtische Gebiete übertragbar.

Fazit

Obwohl in Bezug auf FTTC und DOCSIS einige optimistische und für FTTH sehr konservative Annahmen (Vernachlässigung Aggregationsnetz, Bitraten bzw. Reichweiten, Stromverbrauch DOCSIS3.1 Kabelmodem, DOCSIS3.1 Clusterbitrate) getroffen wurden, *sind die hier betrachteten FTTH Technologien in jedem Szenario (deutschlandweit, städtische, halbstädtische und ländliche Gebiete) und für fast jeden Auslastungsgrad (Anteil homes connected) nachhaltiger als FTTC, DOCSIS sowie FTTB*, wobei FTTB in vielen Ausbaugebieten als wichtiger Zwischenschritt zu einer späteren Erweiterung auf FTTH zu betrachten ist. Sie sind sowohl günstiger beim Stromverbrauch als auch in Bezug auf das Gesamtgewicht der Systemtechnik inkl. der NT/CPE beim Teilnehmer. Das Gewicht kann zumindest als Indikator genommen werden, um erste Aussagen über die benötigten Ressourcen für die Herstellung und Entsorgung zu bekommen. Dies ist deshalb zulässig, weil hier ausschließlich das Gewicht der Systemtechnik betrachtet wurde und man daher davon ausgehen kann, dass bei den entsprechenden Zugangstechnologien ähnliche Materialien verwendet wurden.

Im Detail haben die durchgeführten Berechnungen Folgendes gezeigt:

- Wenn die absoluten Zahlen (Leistungsaufnahme, Gewicht) betrachtet werden, ist GPON in Bezug auf Nachhaltigkeit die günstigste FTTH Variante gefolgt von GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON. Unter idealen Bedingungen (hohe Auslastungsgrade) ist die Leistungsaufnahme von FTTB zwar geringer als für FTTC. In der Praxis wird sich allerdings kein nennenswertes Einsparpotential mit FTTB gegenüber FTTC ergeben. DOCSIS ist die Technologie mit der höchsten Leistungsaufnahme.
- Insbesondere für FTTB aber auch für DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s sind kleine Auslastungsgrade ungünstig. Dies liegt an den vergleichsweise vielen Netzknoten, die für diese Technologien erforderlich sind, und die bei geringen Auslastungen zu einer relativ hohen Leistungsaufnahme pro Teilnehmer führen.
- Bezieht man hingegen den Stromverbrauch und das Gewicht auf die Bitrate, so sind GbE Punkt-zu-Punkt und XGS-PON die günstigsten FTTH Technologien. Der Unterschied ist jedoch in den meisten Fällen gering im Vergleich zu FTTC und DOCSIS. Für DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s ergeben sich in diesem Fall aufgrund der höchsten Leistungsaufnahme und des höchsten Gewichts sowie der geringsten Summenbitrate der hier betrachteten Zugangstechnologien die mit Abstand größten Werte.
- Die deutschlandweite Abschätzung hat gezeigt, dass sich mit GPON gegenüber der Technologie mit der höchsten Leistungsaufnahme (DOCSIS3.1 1000/50 Mbit/s) etwa 530 MW an elektrischer Leistung und mehr als 47.500 t an Gewicht für die Systemtechnik inkl. NT einsparen lassen. Bezogen auf eine Summendatenrate von einem Gbit/s lassen sich mit GbE Punkt-zu-Punkt Systemen sogar fast 4000 MW an Leistung und 297.000 t an Gewicht gegenüber DOCSIS3.1 100/10 Mbit/s einsparen. Zum Vergleich: Typische Kohle-Kraftwerksblöcke erreichen Leistungen zwischen 100 MW und 1000 MW. In städtischen, halbstädtischen und ländlichen Gebieten ergeben sich ähnliche Ergebnisse, wobei die Unterschiede zwischen FTTH und FTTC in ländlichen Gebieten aufgrund der geringeren Auslastung der Kabelverzweiger sowie der passiven Kühlung der FTTH POP größer ausfallen.
- Ab einem bestimmten Auslastungsgrad (abhängig von der Zugangstechnologie zwischen einigen 10 und einigen 100 Teilnehmern pro Netzelement) sind der Stromverbrauch und das Gewicht der NTs beim Teilnehmer der dominante Anteil am Gesamtstromverbrauch bzw. Gewicht. Optimierungen der NT haben folglich im Einklang mit den Ergebnissen aus Ref. [7] und [8] den größten Hebel in Bezug auf

Stromverbrauch bzw. Gesamtgewicht von Zugangsnetzen. Im Zuge dessen wäre die Implementierung von Sleep Modi im CPE von großer Bedeutung. Derartige Mechanismen sind bei DSL (FTTC) zwar technisch möglich und schon seit vielen Jahren standardisiert, führen jedoch aufgrund des Übersprechens zu Instabilitäten im Zugangsnetz und werden daher von den Netzbetreibern in der Praxis nicht eingesetzt. Bei FTTH sind Sleep Modi ebenfalls technisch möglich, sind aber derzeit noch nicht implementiert, obwohl sie zu keinen Instabilitäten im Zugangsnetz führen würden. Hier ergibt sich folglich Optimierungspotential, um den Stromverbrauch von FTTH Technologien noch weiter zu reduzieren. Gemäß Ref. [7] könnte durch die Implementierung von Sleep Modi der Stromverbrauch von Zugangsnetzen weiter um bis 40 % gesenkt werden.

Referenzen

- [1] BREKO Positionspapier „Glasfasernetze und digitale Anwendungen für eine nachhaltige Entwicklung in Deutschland und Europa“, 20.03.2020
- [2] <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit-internationales/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/nachhaltigkeit-als-handlungsauftrag/>
- [3] K. Obermann, M. Horneffer, „Datennetztechnologien für Next Generation Networks“, 2. Auflage 2013, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [4] BREKO Marktanalyse 2021
- [5] Ecobilan S.A., PricewaterhouseCoopers – Sustainable Business Solutions „Developing a generic approach for FTTH solutions using LCA methodology“, 02/2008
- [6] Slavisa Aleksic and Ana Lovric, „Energy Consumption and Environmental Implications of Wired Access Networks“, Vienna University of Technology, 2011.
- [7] Jayant Baliga et al., „Energy Consumption in Wired and Wireless Access Networks“, IEEE Communications Magazine, June 2011
- [8] Rafael Coomonte et al., „How much energy will your NGN consume? A model for energy consumption in next generation access networks: The case of Spain“
- [9] Spectaris Studie, „LICHT als Schlüssel zur globalen ökologischen Nachhaltigkeit“, Berlin/München, Juni 2019.
- [10] <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>
- [11] Bertoldi, P., Lejeune, A. „Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment“, JRT Technical Report, Version 7.1, 2020
- [12] Broadband Forum TR-101 "Migration to Ethernet-Based Broadband Aggregation" Issue: 2, Issue Date: July 2011
- [13] Broadband Forum TR-156 "Using GPON Access in the context of TR-101" Issue 4, Approval Date: November 2017
- [14] https://avm.de/service/fritzbox/fritzbox-7590/wissensdatenbank/publication/show/138_Stromverbrauch-der-FRITZ-Box/
- [15] <https://www.hardwareluxx.de/index.php/artikel/hardware/netzwerk/29687-avm-fritzbox-7490-im-test.html?start=9>
- [16] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flaechennutzungen>
- [17] https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/Raumtypen2010_vbg/raumtypen2010_node.html
- [18] Kristof Obermann „Nachhaltigkeitsvergleich der Zugangnetz-Technologien FTTC und FTTH“, 13.05.2020
- [19] Prysmian Group „Energy consumption of telecommunication access networks“
- [20] Umwelt Bundesamt „Hintergrundinformationen Klimawirkung von Videostreaming & Co.“, Stand: 7. September 2020

Abkürzungsverzeichnis

4G	vierte Mobilfunkgeneration (Long Term Evolution [LTE])
5G	fünfte Mobilfunkgeneration
ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line
CATV	Common Antenna Television
CMTS	Cable Modem Termination System
CPE	Customer Premises Equipment
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DPU	Distribution Point Units
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	Ethernet passive optical network
FTTC	Fiber-to-the-Curb
FTTEx	Fiber-to-the-Exchange
FTTH	Fiber-to-the-Home
FWA	Fixed Wireless Access
G.fast	fast access to subscriber terminals
GbE	Gigabit Ethernet
GigE	Gigabit Ethernet
GPON	Gigabit Passive Optical Network
HFC	Hybrid Fiber Coax
HVt	Hauptverteiler
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IP	Internet Protokoll
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO-OSI	International Standardisation Organisation – Open System Interconnection
IT	Informationstechnik
KVz	Kabelverzweiger
LAN	Local Area Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NAS	Network Attached Storage

NT	Network Termination
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
PON	Passive Optical Network
POP	Point of Presence
POTS	Plain old telephony service
PtP	Point-to-Point
TAE	Telekommunikations-Anschluss-Einheit
THG	Treibhausgas
TK	Telekommunikation
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
XGS-PON	10 Gbit/s PON