

Studienarbeit, Abteilung Informatik

Dual-WAN Router zur Verbesserung der User Experience

Hochschule für Technik Rapperswil

Herbstsemester 2018

18. September 2018

Autoren: Andi Hörler & Jonas Kugler
Betreuer: Prof. Dr. Peter Heinzmann
Projektpartner: cnlab itr AG
Arbeitsperiode: 17.09.2018 - 17.02.2019
Arbeitsumfang: 240 Stunden, 8 ECTS pro Student

Ein spezieller Dank für die Unterstützung und das Korrekturlesen
geht an folgende Personen:

Eric Franke
Felix Kugler

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
Aufgabenstellung	3
Management Summary	8
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage	10
1.2 Dual-WAN	10
1.3 Ziel	11
2 Grundlagen	12
2.1 DNS	12
2.1.1 DNS-Infrastruktur	12
2.1.2 Arten von DNS	12
2.1.3 DNS-Abfragen	13
2.1.4 DNS-Caching	15
2.2 Aufbau eines Webseitenaufrufes	16
2.2.1 Ablauf	16
2.2.2 Namensauflösung	17
2.2.3 Time to First Byte	17
2.2.4 100% Visually Complete Time	18
2.2.5 Document Complete	18
2.2.6 Fully Loaded	18
2.3 Aufrufarten einer Webseite	19
2.3.1 First View	19
2.3.2 Repeated View	19
3 Zu testende Webseiten	20
3.1 Quellen	20
3.1.1 Webseiten Rankings	20
3.1.2 Swisscom	20
3.2 Vergleich der Quellen	20
3.3 Auswahl von Webseiten für Test	21

4	Baseline Tests	22
4.1	Messaufbau	22
4.1.1	Ziel	22
4.1.2	Vorgehen	23
4.2	Testaufbau	23
4.2.1	WebPageTest Tests	23
4.2.2	Streaming Tests	24
4.3	Testdurchführung	24
4.3.1	WebPageTest	24
4.3.2	Streaming	25
4.4	Ziel	25
4.4.1	WebPageTest	25
4.4.2	Streaming	25
4.5	Testresultate	26
4.5.1	WebPageTest	26
4.5.2	Streaming	34
4.6	Einfluss von Werbung	34
4.7	Einfluss der RTT	35
4.8	Zusätzliche Erkenntnisse	35
4.8.1	Unterschiede zwischen 5 Mbit/s und 10 Mbit/s	35
4.8.2	Einfluss von Auslösung auf die Streaming-UX	37
4.8.3	Videokomprimierung	38
5	Entscheidungen Dual-WAN	40
5.1	Fair usage policy	40
5.2	Routing	40
5.2.1	Regeln	40
5.2.2	Streaming Provider	41
5.3	Failover	41
6	Lösungsvorschlag	43
6.1	Packages	43
6.2	IP-Set	43
6.3	MAC-VLAN	44
6.4	MWAN3	44
6.4.1	MWAN Interfaces	44
6.4.2	MWAN Members	44
6.4.3	MWAN Policies	44
6.4.4	MWAN Rules	45
7	Reale Tests	46
7.1	Satellit	46
7.2	DSL	47
7.3	Unterschiede zu simulierten Verbindungen	47

7.3.1	DNS-Anfragen	47
7.3.2	Bandbreite	47
7.3.3	Ladezeiten von Webseiten über Satellit	48
8	Auswertung	49
8.1	Ausgangssituationen für Endkunden	49
8.1.1	Situation 1 (S1) - Reine DSL-Verbindung	49
8.1.2	Situation 2 (S2) - Reine Satelliten-Verbindung	49
8.2	Personas	49
8.2.1	Persona 1 (P1) - Surfer	50
8.2.2	Persona 2 (P2) - Streamer	50
8.2.3	Persona 3 (P3) - Familienhaushalt Streamer und Surfer	50
8.2.4	Zukünftige Erschliessung	50
9	Empfehlungen	52
9.1	Skripts	52
9.1.1	Speichern von Regeln	52
9.1.2	Aktualisierung von Regeln	52
10	Schlusswort	54
11	Ausblick	55
	Acronyme	58

Abstract

In der Schweiz ist gesetzlich geregelt, dass allen Bevölkerungskreisen in allen Landesteilen eine «Grundversorgung im Fernmeldebereich» zur Verfügung gestellt werden muss. Seit dem 1.1.2018 wird eine minimale Datenübertragungsrate für den Internetzugang von 3Mbit/s im Download und 300kbit/s im Upload verlangt. Falls diese Datenrate über die bestehenden Kupferleitungen oder das Mobilfunknetz nicht geliefert werden kann, kommen Verbindungen über geostationäre Satelliten zum Einsatz. Damit sind Datenraten bis zu 40Mbit/s möglich. Die dazu nötige Satellitenkapazität ist aber sehr teuer und die Satellitenverbindungen weisen Round Trip Time (RTT) Werte von rund 600ms auf.

Mittlerweile fordern Politiker eine weitere Erhöhung der Download Datenrate auf 10Mbit/s, was zur Folge hat, dass noch mehr Satellitenkapazität benötigt wird.

In dieser Studienarbeit soll der Einfluss von Datenrate und RTT auf die User User Experience (UX) beim Web-Surfing und Video-Streaming untersucht werden. Insbesondere ist aufzuzeigen, wie die Kombination von Digital Subscriber Line (DSL)- und Satelliten (SAT)- Verbindungen zu einer besseren UX und zur Entlastung der Satellitenkanäle eingesetzt werden könnte. Es soll eine DSL-SAT Dual-Wide Area Network (WAN) Lösung realisiert werden, welche den Datenverkehr an Hand von definierten Regeln über die jeweils UX-optimale WAN-Verbindung sendet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Erhöhung der Download Datenrate von 3 auf 5 und 10Mbit/s, wurden automatisierte Messungen mit dem Open-Source-Tool WebPage-Test durchgeführt. Für Video-Streaming Tests wurden die integrierten Analysetools von YouTube und Netflix genutzt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden Strategien zur Verteilung des Datenverkehrs auf eine DSL-SAT Dual-WAN Lösung entwickelt und auf einem OpenWrt Router implementiert.

Die Analysen zeigen klar, dass die Web-Surfing UX extrem durch die RTT bestimmt ist. Webseiten sollen daher immer über die DSL-Verbindung mit den wesentlich kürzeren RTT (rund 30ms) aufgerufen werden.

Die Qualität der Video-Streams kann durch die Erhöhung der Datenrate verbessert werden. Eine Verbindung mit einer Download-Datenrate von 5Mbit/s liefert auf der Satellitenverbindung 720p anstatt nur 480p Bildauflösung.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl bei DSL als auch bei SAT die Erhöhung der

Datenrate von 5 auf 10 Mbit/s keine Web-Surfing UX-Verbesserung bringt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde mit Hilfe des OpenWrt Modules MWAN3 der Datenverkehr auf die beiden WAN-Anschlüsse eines OpenWrt Routers verteilt. Web-Surfing Traffic geht über die DSL Verbindung, Video Streaming Traffic über den Satelliten. Die Detektion des Video Streaming Traffics erfolgt auf Basis von bekannten Domainnamen für Videoinhalte. Das automatisch aktualisierende Regel-Set (IPSet) erlaubt eine bessere Ausnutzung der verfügbaren Bandbreite und eine UX-Optimierung. Dabei werden Webseiten über DSL schneller angezeigt und Video-Streaming wird über Satellit in besserer Bildauflösung geliefert, ohne die Websurfing Antwortzeiten zu beeinträchtigen.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung wird am Ende der Arbeit mit allen allfälligen Anpassungen ergänzt, gescannt und an dieser Stelle eingefügt.

Dual-WAN Router zur Verbesserung der User Experience

Studiengang: Informatik
Semester: HS 2018
Durchführung: Studienarbeit

Fachrichtung: Internet-Technologien und -Anwendungen
Institut: INS
Studenten: Andi Hörler und Jonas Kugler

Betreuer: Peter Heinzmann (HSR/cnlab), Eric Franke (cnlab), Raphael Juchli (cnlab)
Industriepartner: [Swisscom Grundversorgung](#), [SES Broadband Services](#), [cnlab itr ag](#)

Ausgangslage

Für den Internet-Grundversorgungsauftrag muss Swisscom die Qualität der Breitband-Dienste anhand von Datenratenmessungen unter Beweis stellen. Diese Messungen zuhanden des Bundesamts für Kommunikation (BAKOM) führt cnlab durch. Gegenwärtig fordern Politiker eine Erhöhung der mindestens verfügbaren Datenrate von 3 Mbit/s auf 10 Mbit/s [1]. Im Ausnahmefall kommen für die Erfüllung des Grundversorgungsauftrags Satellitenverbindungen zum Einsatz [2] [3]. Bei diesen Verbindungen über geostationäre Satelliten beträgt die Round Trip Time (RTT) der Datenpakete rund 600ms. Das Kundenerlebnis beim Web-Surfing ist weniger durch die Datenrate als durch die Round Trip Time bestimmt. Messungen bei Cnlab lassen vermuten, dass die Erhöhung der Datenrate dem Kunden keine wirkliche Verbesserung des Surferlebnisses bringt.

Das «Kundenerlebnis» -auch «User Experience» genannt, wird allerdings nicht nur durch die Antwortzeiten beim Web-Surfing bestimmt. Immer wichtiger werden auch andere Dienste wie Videostreaming (z.B. YouTube und Vimeo), Live Video (z.B. Zattoo, Wilmaa, Dazn, SRF Live), Audio-Streaming / Internet Radio (z.B. Spotify, Swiss Jazz, SRF Live), Voice-over-IP (VoIP) (z.B. Skype, Whatsapp, Facebook), verteilte Dokumente Verarbeitung (z.B. Office 365, Google Doc), Storage/File Sharing (z.B. OwnCloud, Dropbox, OneDrive, Google Drive, iCloud) oder remote Access Dienste (z.B. Citrix, TeamViewer). Manche dieser Dienste benötigen vor allem hohe Datenraten, andere benötigen auch schnelle RTT.

Es wird daher untersucht, ob den Endkunden ein besseres Surferlebnis geboten werden kann, indem man sie nicht nur über schnellere Satellitenverbindungen, sondern auch über «langsame» Digital Subscriber Line (DSL) Verbindung (mit rund 20ms RTT und 2 Mbit/s Download- und 0.2 Mbit/s Upload-Datenraten ans Internet anschliesst. Man spricht in diesem Zusammenhang von Satelliten–DSL Dual-WAN Lösungen.

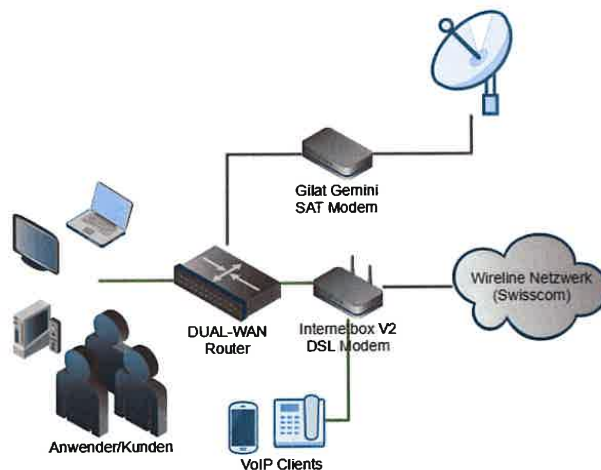


Abbildung 1 Satelliten-DSL Dual-WAN Systemübersicht

Dual WAN Router werden gegenwärtig vor allem zur Lastverteilung und zur Erhöhung der Verfügbarkeit eingesetzt. Swisscom bietet auf der InternetBox unter der Produktebezeichnung «Internet Booster» [4] eine DSL-LTE Dual-WAN-Lösung zur Erhöhung der verfügbaren Datenraten an. Diese verwendet den Multipath TCP (MPTCP) Standard [5]. Weil MPTCP nicht gut funktioniert, wenn die beiden WAN-Pfade stark unterschiedliche Verzögerungen aufweisen, werden bei cnlab itr ag für Satelliten-DSL Dual-WAN alternative Lösungen untersucht.

OpenWRT [6] ist eine Linux-Distributionen für Heimrouter, auf der man eigene Routing-Funktionen – unter anderem auch Dual-WAN-Routing – implementieren kann.

Im Rahmen dieser Studienarbeit sollen Dual-WAN-Ansätze untersucht und mit OpenWRT realisiert werden. Diese Satelliten-DSL Dual-WAN Lösungen sollen neben Redundanz und höheren Datenraten, vor allem ein besseres Kundenerlebnis liefern.

Ziel


Es soll eine Satelliten-DSL Dual-WAN Router Lösung verfügbar sein, welcher die User Experience für Grundversorgungsanschlüsse verbessert.

Aufgaben

- Einarbeitung
 - Grundkenntnisse zu den Swisscom Grundversorgungsdiensten über Satelliten-Internet (Systemarchitektur, Einfluss von Traffic Shaper / Acceleratoren)
 - Bestimmung des Einflusses von Faktoren (Round Trip Time, Download-/Upload-Datenrate, Packet Loss) auf die User Experience im Heimbereich bei verschiedenen Diensten (Web Surfing, Audio- und Videostreaming, Cloud Services)
 - Messungen mit dem Netzwerk Emulator Aposite
 - Studium und Implementierung von Dual-WAN Lösungen mit OpenWRT
- Analyse
 - Grundsätzlich verschiedene Ansätze der Verkehrsaufteilung:
 - Network Layer (WAN-Port Wahl basieren auf Lastaufteilung, Round Robin, IP-Adressen und IP-Adressbereichen)
 - Transport Layer (WAN-Port Wahl basierend auf Protokollen)
 - Socket Layer / Services (WAN-Port Wahl basierend auf Socket)
 - Application Layer (z.B. WAN-Port Wahl basierend auf DNS-Namen)
 - Einfluss verschiedener Dual-WAN Lösungsansätze auf die User Experience
 - Einfluss verschiedener Dual-WAN Lösungsansätze auf die Auslastung der Satellitenkanäle
- Design
 - Bestimmung von User Experience Optimierungsverfahren mit Hilfe von DSL-SAT Dual-WAN Verbindungen
 - Möglichkeiten zur Anpassung der Konfigurationen
- Realisierung
 - Realisierung eines DSL-SAT Dual-WAN Routers
- Testing
 - Robustness der Lösung (Einfluss Anzahl TCP-Streams, https, http/2)
 - Bedienbarkeit- und Konfigurierbarkeit
 - Bestimmung der Verbesserung der User Experience durch die neue DSL-SAT Dual-WAN Router Lösung

Referenzen

- [1] Das Schweizer Parlament, «Erhöhung der Internet-Mindestgeschwindigkeit in der Grundversorgung auf 10 Megabit pro Sekunde,» 27 April 2016. [Online]. Available: <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefte?AffairId=20163336>.
- [2] ASTRA, «ASTRA Connect,» [Online]. Available: <https://de.astra.ses/tv-radio-mehr/astra-connect>.
- [3] SES, «Satellites,» [Online]. Available: <https://www.ses.com/our-coverage/satellites>.
- [4] Swisscom, «Internet-Booster,» [Online]. Available: <https://www.swisscom.ch/de/privatkunden/internet-fernsehen-festnetz/internet/internet-booster.html>.
- [5] Wikipedia, «Multipath TCP,» [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Multipath_TCP.
- [6] Wikipedia, «OpenWrt,» [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/OpenWrt>.
- [7] BAKOM, «SR 784.101.113/1.2 Dienstqualität der Grundversorgung,» 12 Dezember 2016. [Online]. Available: https://www.bakom.admin.ch/dam/bakom/de/dokumente/bakom/das_bakom/rechtliche_grundlagen/vollzugspraxis/SR-784-101-113-12-dienstqualitat-der-grundversorgung.pdf.download.pdf/1.2%20Dienstqualit%C3%A4t%20der%20Grundversorgung.pdf.

Rapperswil 17.12.2018


Management Summary

In der Schweiz gibt es die sogenannte Grundversorgung im Fernmeldebereich (nachstehend Grundversorgung). Die Grundversorgung setzt die rechtlichen Mittel, dass jeder Bewohner der Schweiz ein Anrecht auf einen Internetzugang hat. Seit dem 1. Januar 2018 beträgt die Grundversorgung 3000 Kbit/s im Download und 300 Kbit/s im Upload. Zuvor war die Geschwindigkeit auf 2000 Kbit/s im Download und 200 Kbit/s im Upload festgelegt.

Die Grundversorgung muss nach gesetzlich *erschwinglich, zuverlässig und von einer bestimmten Qualität* sein [1]. Das Gesetz schreibt hierbei jedoch nicht vor, wie die Grundversorgung erreicht werden muss. In einigen Regionen kann die Grundversorgung mittels Kupferkabel oder Mobilfunknetz gewährleistet werden. Trotzdem gibt es Gebiete, in denen keine der beiden Varianten verfügbar oder die bestehende Internetverbindung via Kupferkabel zu langsam für die festgelegte Grundversorgung ist. In solchen Fällen wird die Verbindung über einen Satelliten aufgebaut. Die Internetverbindung über den geostationären Satelliten weist jedoch eine erheblich höhere Round Trip Time (RTT) ($\sim 600\text{ms}$) als eine Verbindung via Kupferkabel ($\sim 30\text{ms}$) auf. Die RTT sagt aus, wie lange ein Paket für den Weg vom Endkunden bis zum Server und wieder zurück benötigt. Weiter sind die benötigten Kapazitäten auf dem Satellitenkanal sehr teuer, da diese beim Betreiber der Satelliteninfrastruktur gemietet werden müssen.

Einige Politiker fordert nun, dass die Grundversorgung auf 10'000 Kbit/s im Upload und 1'000 Kbit/s im Download angehoben werden sollte [2]. Das würde bedeuten, dass die Satellitenkapazität nochmals erhöht werden müsste. Dazu kämen weitere Kunden, welche durch die aktuelle Internetverbindung über das Kupferkabel nicht mehr die neu geforderten Geschwindigkeiten erreichen könnten.

Diese Studienarbeit befasst sich mit dem Einfluss von Internetgeschwindigkeit und RTT und auf die User Experience (UX) beim Web-Surfing und Video-Streaming. Zudem wird betrachtet, wie die Kombination von Digital Subscriber Line (DSL)- und Satelliten (SAT)-Verbindungen zu einer besseren UX führen und dadurch zur Entlastung der Satellitenkanäle eingesetzt werden könnte. Es soll eine DSL-SAT Dual-WAN Lösung realisiert werden, welche den Datenverkehr an Hand von definierten Regeln über die jeweils UX-optimale WAN Verbindung sendet.

Die Analysen zeigen klar, dass die Web-Surfing-UX durch die RTT bestimmt ist. Web-

seiten sollen daher immer über die DSL-Verbindung mit der wesentlich kürzeren RTT aufgerufen werden. Die Qualität der Video-Streams kann durch die Erhöhung der Internetgeschwindigkeit verbessert werden. Mit einer Geschwindigkeit von 5 Mbit/s im Download liessen sich Videos mit 720p anstelle von nur 480p Bildauflösung schauen. Es konnte zudem gezeigt werden, dass sowohl bei DSL als auch bei SAT die Erhöhung der Datenrate von 5 auf 10 Mbit/s keine UX-Verbesserung für das Web-Surfing bringt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Router programmiert, welcher den Internetverkehr bestmöglich aufteilt, sodass die UX für beide Fälle optimal ist.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Swisscom ist in der Schweiz für die Internet-Grundversorgung zuständig. Im Sommer 2017 wurde die Grundversorgungskonzession für die Periode 2018-2022 erneut an die Swisscom vergeben [3]. Basierend auf den darin enthaltenen Bestimmungen hat die Swisscom die garantierte Übertragungsrate des Grundangebots per 01.01.2018 auf 3000/300 Kbit/s erhöht [4]. Am 27.04.2016 wurde vom Bündner Nationalrat Martin Candinas eine Motion [2] eingereicht, welche eine Übertragungsrate von mindestens 10 Mbit/s in der Grundversorgung fordert. Entgegen der Empfehlung des Bundesrates wurde diese Motion am 30.05.2017 vom Nationalrat und am 05.03.2018 vom Ständerat angenommen. Bereits heute kommen an einigen Standorten Satellitenverbindungen zum Einsatz, um den Grundversorgungsauftrag zu erfüllen. An diesen Standorten ist die Kabel-Infrastruktur inexistent oder unzureichend. Mit der möglichen bevorstehenden Datenratenerhöhung auf mindestens 10 Mbit/s würde der Einsatz von Satellitenverbindungen an vielen weiteren Standorten unumgänglich werden.

Trotzdem ist die Datenrate nicht alles. Die User Experience (UX) kann stark von der Round Trip Time (RTT) abhängig sein. Die Aushandlung für den Download einzelner Elemente können durch die RTT wesentlich verlangsamt werden. Bei einer relativ hohen RTT, wie sie bei einer Satellitenverbindung auftritt, kann dies trotz hoher Bandbreite negative Auswirkungen auf die UX haben. Bereits heute sind Dual-WAN Lösungen mit Digital Subscriber Line (DSL) und Anbindung an ein Mobilfunknetzwerk im Einsatz, welche keinen derart hohen RTTs aufweisen [5].

1.2 Dual-WAN

Dual-Wide Area Network (WAN) beschreibt eine Funktion, mit der mehrere Internet-Kanäle gebündelt werden. Dadurch kann zum einen Ausfälle eines einzelnen Kanals überbrückt oder zum anderen die jeweiligen Vorteile eines Kanals genutzt werden.

Das Prinzip hinter dieser Dual-WAN-Lösung ist, dass die passendere Internet-Linie für einen bestimmten Verwendungszweck ausgewählt und so deren Stärken gegenüber anderen Technologien ausgenutzt wird.

Die kleinere RTT der DSL-Linie eignet sich besser für Dienste, welche eine kurze Antwortzeit benötigen. Services mit höherem Anspruch an die Bandbreite und weit we-

niger Verlangen von kurzen Antwortzeiten können von der grösseren Bandbreite der Satelliten-Verbindung profitieren.

1.3 Ziel

Es soll ein Satelliten-DSL Dual-WAN Router erarbeitet werden, welcher den Datenverkehr der Benutzer so auf die verfügbaren Verbindungen verteilt, dass für den Endbenutzer eine möglichst gute UX entsteht.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit grundlegenden Wissensgebieten, welche in den weiteren Kapiteln aufgefasst werden.

2.1 DNS

2.1.1 DNS-Infrastruktur

Die oberste Instanz der Domain Name System (DNS)-Infrastruktur sind 13 Domains, welche via Anycast auf mehrere Root-Nameserver zeigen. Diese Root-Nameserver sind die Einstiegspunkte für jede DNS-Anfrage weltweit. Um die Antwortzeiten möglichst kurz zu halten und um die weltweite Namensauflösung robuster zu machen, sind dieser Server mehrfach vorhanden und über die ganze Welt verteilt. Die Root-Nameserver repräsentieren hierbei den letzten Punkt am Ende eines Fully qualified domain name (FQDN), da die Root-Zone selbst keinen Namen besitzt [6]. Bei einer Anfrage an eine Top Level Domain (TLD) verweist ein Root-Nameserver, dank seiner Root Zone Database, direkt auf einen TLD-Provider und dessen Name-Servern [7].

Die nachfolgende Instanz sind die Nameserver der TLDs. Diese Nameserver verwalten die DNS-Records der jeweiligen TLD. Die Name-Server der TLD .ch werden durch die SWITCH [8] betrieben.

Name-Server der Second Level Domains (SLDs) können danach von beliebigen Parteien betrieben werden. Sie liefern Informationen zu Internet Protocol (IP)-Adressen, alternativen Namen und weiteren DNS-Typen [9]. Die Server können die Anfragen auch weiterreichen.

2.1.2 Arten von DNS

Traditionelles DNS

Das traditionelle DNS nutzt einen eigenen Port für die Namensauflösung. Die Übermittlung der Information ist nicht verschlüsselt. Momentan ist dies noch die meistgenutzte Art der DNS-Auflösung.

Ein wesentlicher Nachteil der unverschlüsselten Übertragung ist die fehlende Vertraulichkeit und Integrität. DNS-Antworten könnten durch einen Man-in-the-Middle abgefangen, ausgelesen und gefälscht werden. Somit liessen sich die Auflösungen der Domain-

namen auf falsche IP-Adressen umschreiben.

DNS over HTTPS

DNS over HTTPS (DoH) verfolgt den Ansatz, dass DNS-Anfragen über das HTTPS-Protokoll versendet werden. DoH wurde nach längeren Tests, unter Google Chrome und Mozilla Firefox, unter dem RFC 8484 standardisiert [10].

Der grosse Vorteil von DoH ist, dass die Anfragen verschlüsselt über den Kanal versendet werden. Die Endpunkte für die DNS-Auflösung werden hierfür als IP-Adressen hinterlegt. Dadurch ist die erste Auflösung nicht potenziell gefährdet durch einen Man-in-the-Middle-Angriff. Ein Nachteil ist jedoch, dass der DNS-Traffic nicht weiterverfolgt werden kann. Jegliche Verbindung zum DoH-Endpunkt läuft über den Port 443 [11] und vermischt sich somit mit den weiteren Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS)-Verbindungen. Dadurch lässt sich der DoH-Traffic nicht immer von generellem HTTPS-Traffic trennen, da es unmöglich ist, jegliche DoH-Endpunkte zu erfassen.

2.1.3 DNS-Abfragen

Ablauf einer traditionellen rekursiven DNS-Abfrage

Bei einer DNS-Anfrage über den Provider werden verschiedene Schritte durchgearbeitet bis der Router eine effektive IP-Adresse zurückerhält. Das Beispiel behandelt hierbei die Situation, sofern der DNS-Server des Providers die aktuelle Domain noch nicht gecached hat - siehe Abschnitt 2.1.4.

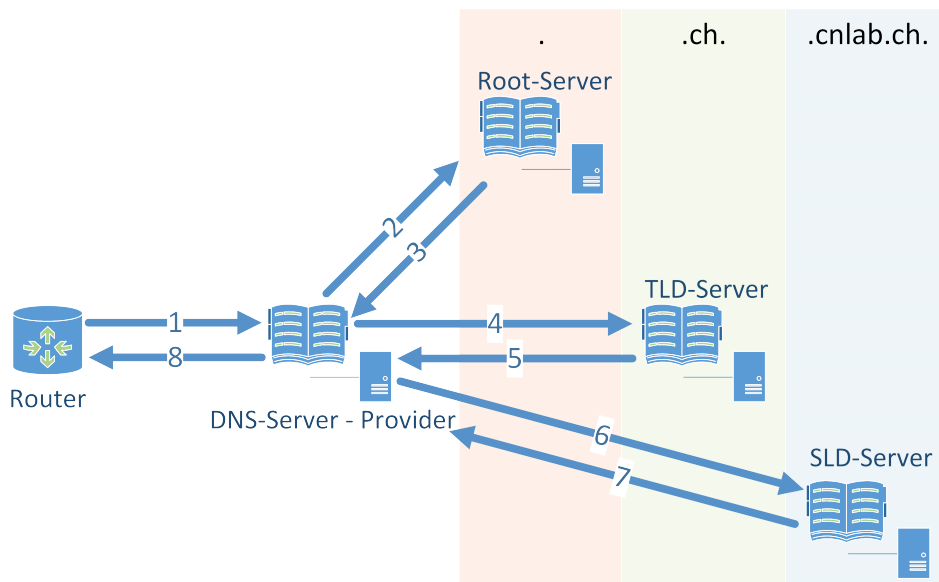


Abbildung 2.1: Rekursive DNS-Abfragekette

1. Anfrage an den DNS-Server des Providers um die IP-Adresse des gewünschten Hosts `www.cnlab.ch` aufzulösen.
2. Anfrage vom DNS-Server weiter zum Root-Server, welcher die Root Zone Datenbank hostet.
3. Der Root-Server sendet die Antwort, dass der DNS-Server des Providers eine weitere Anfrage an einen Name-Server der TLD `.ch` senden sollte.
4. Der DNS-Server sendet eine weitere Anfrage an einen Name-Server der `.ch` Domain. Hierbei bittet er wiederum um die Auflösung des Hosts `www.cnlab.ch`.
5. Der Name-Server von der TLD `.ch` antwortet daraufhin, dass man einen weiteren Request an den Name-Server `.cnlab.ch` senden sollte.
6. Der DNS-Server sendet daraufhin eine weitere Anfrage an den Name-Server der `.cnlab.ch` Domain.
7. Der DNS-Server antwortet nun mit der effektiven IP-Adresse des gesuchten Hosts `www.cnlab.ch`.
8. Nachdem der DNS-Server des Providers die Antwort erhalten hat, speichert er den Eintrag in seiner DNS-Datenbank und stellt danach dem Router die IP-Adresse zu.

Ablauf einer DoH-Abfrage

Eine DoH-Abfrage setzt eine aktive HTTPS-Verbindung mit dem öffentlichen DoH-Server voraus. Über den sicheren Kanal werden die Anfragen verschlüsselt übertragen. Die Anfrage kann dabei mit einem simplen Query mit den zu suchenden Informationen initiiert werden [12]. Die verschlüsselte und somit nicht veränderbare Antwort wird mit einem JavaScript Object Notation (JSON)-Objekt, welches die aufgelösten DNS-Informationen beinhaltet, übermittelt. Der Client muss für dieses Verfahren die IP-Adresse des DoH-Servers direkt hinterlegt haben, da sonst wieder eine Man-in-the-Middle-Attacke möglich wäre.

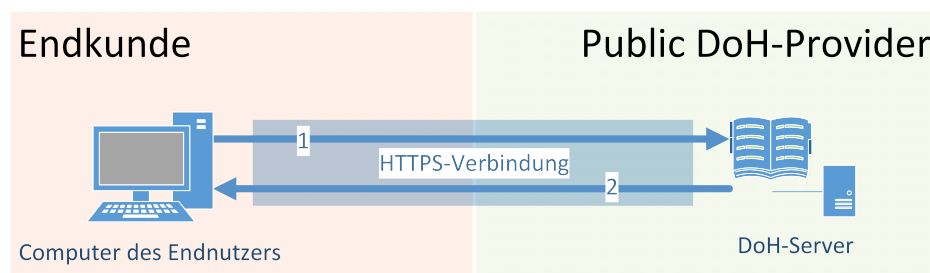


Abbildung 2.2: Rekursive DoH-Abfrage

1. Der Computer des Endbenutzers startet einen DoH-Request.

2. DoH-Response, welches ein JSON-Objekt mit den nötigen Informationen übermittelt.

2.1.4 DNS-Caching

DNS-Caching spart beim Laden von Webseiten viel Zeit ein. Um dabei ein besseres Verständnis zu ermöglichen, sind unten die wichtigsten Begriffe zum DNS-Caching gelistet.

TTL

Die Time to live (TTL) gibt an, wie lange ein DNS-Response gültig ist. Der Wert von TTL wird in Sekunden angegeben und wird mit dem jeweiligen DNS-Response mitgeliefert. Die TTL wird durch den Domain-Inhaber definiert und muss zwischen 0 und $2^{32} - 1$ Sekunden liegen [13]. In Ausnahmefällen kann der Empfänger die TTL eines Eintrags noch anpassen, bevor er diesen in seinen Cache schreibt. Nach dem Ablauf der TTL im DNS-Cache wird der DNS-Eintrag gelöscht. Bei erneuter DNS-Abfrage wird wieder eine DNS-Anfrage zum nächsten Device in der Kette gestartet. Dieser Zyklus wiederholt sich danach stetig.

Caching-Varianten

DNS-Responses können für Geräte beim Endkunden verschieden gehandhabt werden. Hierbei spielen die folgenden Caching-Optionen eine wichtige Rolle für die Ladezeiten von Webseiten. In den kommenden Zeilen wird auf die nachfolgende Grafik verwiesen. Kombinationen von DNS-Caches sind möglich.

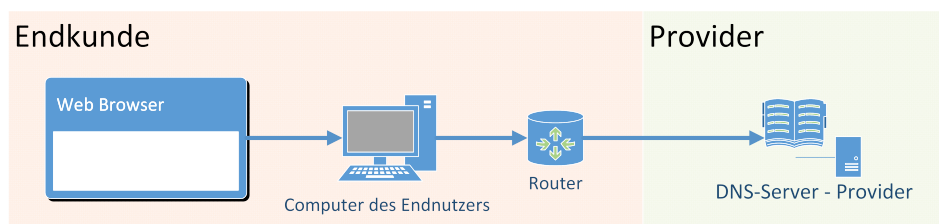


Abbildung 2.3: Caching-Stellen einer DNS-Abfrage

Sofern ein System selbst die Antwort auf einen DNS-Request im lokalen Cache besitzt, wird direkt die Antwort zurückgesendet. Anderenfalls wird der Request weitergeleitet bis eine Antwort zurückkommt. Die weiteren Schritte seitens Provider werden bewusst nicht behandelt.

Kein DNS-Cache: Auf keinem der Systeme beim Endkunden ist ein DNS-Caching aktiviert. Dadurch wird jeglicher DNS-Request des Clients direkt an den DNS-Server des Providers geleitet. Dies hat zur Folge, dass die Zeit für die DNS-Anfrage somit gleich oder grösser als die RTT zum DNS-Server ist.

Router DNS-Cache: Auf dem Router des Endkunden ist das DNS-Caching aktiviert. Dadurch muss ein Client keine weitere Anfrage mehr an den DNS-Server des Providers senden. Dadurch wird die RTT zum Provider eingespart. Ein weiterer Vorteil ist, sofern mehrere Clients im selben Netzwerk sind, könnte dieselbe DNS-Abfrage zuvor schon von einem anderen Rechner getätigt worden sein. Dadurch wäre für den nächsten Client der DNS-Eintrag schon im Cache des Routers hinterlegt.

Client DNS-Cache: Direkt auf dem Client des Endkunden ist DNS-Caching aktiviert. Dadurch erspart sich der Client die RTT zum Router. Der Router wird somit auch von ständigen DNS-Anfragen entlastet.

Browser DNS-Cache: Der Browser hat selbst DNS-Caching aktiviert. Dadurch muss der Browser keine erneuten DNS-Requests an den Computer senden. Hierbei ist die Einsparung gering. Dennoch kann so der Client von DNS-Abfragen entlastet werden, da diese auch Rechenzeit beanspruchen.

2.2 Aufbau eines Webseitenaufrufes

2.2.1 Ablauf

In dieser Arbeit werden oft Begriffe und Metriken im Zusammenhang mit dem Aufruf einer Webseite verwendet. Im Folgenden werden daher einige dieser Begriffe anhand eines mit der öffentlichen Version von WebPageTest [14] aufgezeichneten Aufrufs der Webseite www.google.com erklärt.

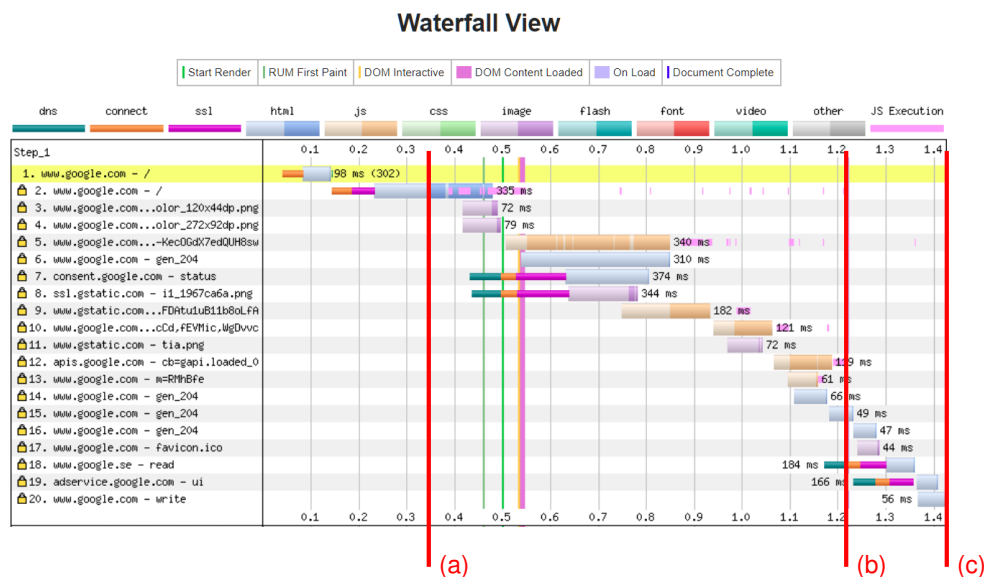


Abbildung 2.4: Aufgezeichneter Aufruf der Website www.google.com

2.2.2 Namensauflösung

Damit ein Browser weiss, an welchen Server die Anfragen für den Aufruf einer Website gesendet werden müssen, muss als erstes der im Uniform Ressource Locator (URL) enthaltene Domain-Namen zu einer IP-Adresse aufgelöst werden. Bei den meisten Betriebssystemen wird dafür zuerst in der sogenannten Hosts-Datei nachgeschaut ob für diesen Domain-Namen ein Eintrag mit zugehöriger IP-Adresse besteht. Ist dies nicht der Fall, wird zuallererst nachgeschaut, ob dieser DNS-Eintrag schon im lokalen DNS-Cache vorhanden ist. Sofern dies nicht der Fall ist wird eine Anfrage an einen DNS-Server geschickt. Die Antwort des DNS-Servers beinhaltet dann die dem Domain-Namen zugehörige IP-Adresse.

2.2.3 Time to First Byte

Sobald der Browser weiss, an welche Adresse er seine Anfrage senden soll, wird die eigentliche Hypertext Transfer Protocol (HTTP)-Anfrage abgeschickt. Die Zeit ab dem Versenden dieser Abfrage bis zum Erhalt des ersten Byte an Information von der angefragten Webseite wird als Time to First Byte (TTFB) bezeichnet. In Abbildung 2.4 wird das erste Byte bei 0.344s (a) erhalten. Die erste in Abbildung 2.4 ersichtliche Anfrage wurde zwar schon früher beantwortet, da es sich bei dieser Antwort jedoch nur um einen Redirect (Responsecode 302) handelte wurde dies nicht für die Metrik TTFB berücksichtigt.

2.2.4 100% Visually Complete Time

100% Visually Complete Time (VCT) wird gemessen, indem man den sichtbaren Zustand der Website am Ende eines Seitenaufrufs mit den Zuständen während des Ladevorgangs vergleicht. VCT gibt die Zeit vom Beginn des Seitenaufrufs bis zu dem Zeitpunkt, an dem der sichtbare Bereich der Seite dem Endzustand entspricht, an. In Abbildung 2.4 ist dieser Zustand nach 1.2s erreicht. Alle Informationen, welche nach diesem Zeitpunkt geladen werden, haben keinen Einfluss mehr auf das sichtbare Resultat. VCT ist somit auch von der Display-Grösse abhängig. Gewisse Seiten zeigen zudem je nach Display-Grösse anderen Inhalt. Zusätzlicher Inhalt ist wiederum an mehr Anfragen gebunden, welche somit auch die VCT noch vergrössern.

2.2.5 Document Complete

Unter der Kategorie Document Complete sind drei Metriken zu finden:

- **Time:** Gibt an wie lange es von der ersten Anfrage bis zu Document Complete dauert.
- **Requests:** Gibt an wie viele Requests bis zum Zeitpunkt von Document Complete abgesetzt wurden.
- **Bytes in:** Gibt an wie viele Bytes bis zum Zeitpunkt von Document Complete übermittelt wurden.

Diese Metriken beziehen sich auf den Moment, an welchem alle statisch referenzierten Ressourcen (Bilder, Skripts, Stylesheets, etc.) einer Webseite geladen wurden. Dieser Moment wird durch den OnLoad-Event bestimmt [15]. Ab diesem Zeitpunkt werden nur noch weitere Ressourcen geladen, wenn diese durch JavaScript aufgerufen werden. Der OnLoad-Event wurde in Abbildung 2.4 nach 1.217s (b) ausgelöst.

2.2.6 Fully Loaded

Unter der Kategorie Fully Loaded sind folgende drei Metriken zu finden:

- **Time:** Gibt an wie lange es von der ersten Anfrage bis zu Fully Loaded dauert.
- **Requests:** Gibt an wie viele Requests bis zum Zeitpunkt von Fully Loaded abgesetzt wurden.
- **Bytes in:** Gibt an wie viele Bytes bis zum Zeitpunkt von Fully Loaded übermittelt wurden.

Die Metriken unter Fully Loaded beziehen sich auf den gesamten Seitenaufruf bis zu dem Zeitpunkt, ab welchem für zwei Sekunden keinerlei weiterer Netzwerkverkehr stattfindet [15]. Zum Zeitpunkt von Fully Complete sind somit alle statischen und alle durch Skripts angeforderten Ressourcen komplett geladen worden. Der gesamte Aufruf der Website www.google.com in Abbildung 2.4 wurde nach 1.423s (c) abgeschlossen.

2.3 Aufrufarten einer Webseite

WebPageTest testet Webseiten mit zwei Arten von Aufrufen einer Webseite. Zum einen wird der First View und zum anderen die Repeated View getestet.

2.3.1 First View

Bei First View werden alle benötigten Daten der Webseite vom Server an den Browser übertragen. Dies ist zeitintensiv, da jedes Element komplett neu heruntergeladen werden muss. Bei geringer Bandbreite bedeutet dies unnötige Auslastung bei statischen Inhalten.

WebPageTest erzwingt diese Messung indem der Browsercache und Cookie-Store vor jedem Seitenaufruf gelöscht wird [15]. Das localStorage Object des Browsers wird auch gelöscht, da das ganze Browser Profil gelöscht wird vor einem erneuten First View Tests [16]. Das sessionStorage Objekt wird automatisch beim Schliessen des Browser Fensters gelöscht [17].

2.3.2 Repeated View

Um nicht bei jedem Webseitenaufruf den gesamten Inhalt erneut zu laden, kann man den Cookie-Header Cache-Control setzen. Dieser Header teilt dem Browser mit, dass ein Element eine gewisse Gültigkeit besitzt. Bei erneutem Aufruf der Webseite und Anfragen an ein solches Element mit gesetztem "Cache-Control", kann der Browser das jeweilige Element, während der gesetzten Zeitspanne, aus seinem eigenen lokalen Cache beziehen. Somit entfällt der erneute Download des Elements vom Webserver.

Sofern kein Flag für die "Cache-Control" gesetzt wurde, können die Browser von sich aus selbst die Seite cachen. Die Caching-Dauer kann hier jedoch zwischen den Browsern abweichen. [18].

Dadurch wird Bandbreite eingespart, welche somit für andere Elementen verwendet werden kann. Der Cookie-Header ist somit vor allem für Zugriffe auf eine Seite mit vielen wenig änderndem Inhalt von Vorteil.

WebPageTest startet direkt nach einem First View Test einen Repeated View Test, bei dem weder der Browsercache geleert wird noch Cookies gelöscht werden [15].

3 Zu testende Webseiten

Um ein gewünschtes Set an Webseiten zu ermitteln, werden die meistgenutzten Webseiten der Schweiz verwendet. Da es hierfür verschiedene Quellen gibt um ein Set von 20 Seiten zu ermitteln, wird hierbei auf verschiedene Quellen zurückgegriffen.

3.1 Quellen

3.1.1 Webseiten Rankings

Alexa

Das Alexa Webseiten-Ranking basiert auf Daten, welche bei Benutzern der Alexa-Toolbar und über Skripts auf Webseiten gesammelt wurden [19]. Über den nicht-kommerziellen Zugriff können jeweils die ersten 50 Einträge eines Rankings eingesehen werden [20].

SimilarWeb

Das Ranking von SimilarWeb beruht auf Daten, welche direkt auf Computern, bei Internet Service Providers (ISPs), aus öffentlichen Quellen von Webseiten rund um die Welt und mit eigenen Messungen gesammelt werden [21]. Der kostenfreie Zugriff erlaubt das Einsehen der ersten 50 Einträge eines Rankings inklusive der Information, wie sich eine Domain innerhalb des Rankings im Vergleich zum Vormonat bewegt hat [22].

3.1.2 Swisscom

Von der Firma cnlab itr AG wurden uns Daten zu DNS Anfragen auf die DNS Server der Swisscom zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen jegliche DNS Abfragen und müssen daher vor einer weiteren Verwendung bereinigt werden. Im Gegensatz zu den Informationen aus den Rankings, sind in dieser Liste die angefragten Ressourcen gelistet, was zu mehr als einem Eintrag pro Domain führt.

3.2 Vergleich der Quellen

Alle drei Quellen verfolgen einen anderen Ansatz der Informationsbeschaffung. Alexa widerspiegelt lediglich das Nutzerverhalten von Personen, welche freiwillig die

Alexa-Toolbar verwenden. Dies schränkt die Auswahl der möglichen Top 50 Webseiten ein. Trotzdem kann man davon ausgehen, dass die Seiten in den Top-20 aussagekräftig sind.

SimilarWeb hingegen nutzt direkte Quellen bei den ISPs. Somit werden alle Benutzer berücksichtigt. Trotzdem fällt eine Unstimmigkeit auf, da die Seite des Bundes admin.ch unter den Top 20 ist. Warum diese Seite unter den Top 20 platziert ist, ist nicht schlüssig. Swisscom nutzt ihre eigenen DNS-Server, um Anfragen an Domains zu messen. Dabei wird keine Rücksicht genommen, ob die angefragte Domain wirklich auf eine Web-Seite zeigt. Viele Domains sind hierbei Update Services von einzelnen Software-Herstellern. Dadurch ist ein vorheriges Filtern der Seiten unerlässlich.

3.3 Auswahl von Webseiten für Test

Die drei vorab beschriebenen Quellen dienen als Grundlage für die Liste, welche für die Tests im weiteren Verlauf dieses Projekts verwendet werden soll.

In erster Linie werden jene Webseiten für die Tests berücksichtigt, welche in mehreren Rankings vorkommen. Zusätzlich wird darauf geachtet, dass verschiedene Kategorien von Webseiten berücksichtigt werden. Bei Webseiten wie www.srf.ch, welche in anderen Sprachversionen (www.rts.ch) eine andere Webseite nutzt, werden auch diese berücksichtigt, um der Sprachsituation in der Schweiz Rechnung zu tragen.

4 Baseline Tests

Es wurden Baseline Tests erstellt, um aufzuzeigen, welche Faktoren für eine produktive Umsetzung der Dual-WAN-Lösung beachtet werden sollten. Die Baseline Tests werden über simulierte Internetverbindungen durchgeführt, um unabhängig Bandbreite und RTT einstellen zu können.

4.1 Messaufbau

4.1.1 Ziel

Das Ziel dieser Analyse ist es zu ermitteln, wie sich die Eigenschaften der Internet-Anbindung eines Anwenders auf dessen Surf- und Streaming-Erlebnis auswirkt. Dabei gilt es sechs Konfigurationen für das Surfing zu berücksichtigen:

- DSL
 - 3 Mbit/s Download, 0.3 Mbit/s Upload
 - 5 Mbit/s Download, 0.5 Mbit/s Upload
 - 10 Mbit/s Download, 1 Mbit/s Upload
- Satellit
 - 3 Mbit/s Download, 0.3 Mbit/s Upload
 - 5 Mbit/s Download, 0.5 Mbit/s Upload
 - 10 Mbit/s Download, 1 Mbit/s Upload

Für das Streaming wurden folgende Konfigurationen angeschaut:

- DSL
 - 3 Mbit/s Download, 0.3 Mbit/s Upload
 - 5 Mbit/s Download, 0.5 Mbit/s Upload
- Satellit
 - 3 Mbit/s Download, 0.3 Mbit/s Upload
 - 5 Mbit/s Download, 0.5 Mbit/s Upload

Die Resultate dieser Messungen können anschliessend als Baseline verwendet werden. So können künftige Messungen nach der Umsetzung von Massnahmen zur Verbesserung der UX mit den Baseline-Resultaten verglichen werden, um aufzuzeigen, wie sich die erzielten Verbesserungen auswirken.

4.1.2 Vorgehen

Mithilfe des Tools WebPageTest werden Zugriffe auf eine Liste von Webseiten gestartet, analysiert und aufgezeichnet. Tests von Streaming Providern werden manuell durchgeführt und mit Screenshots belegt. Als Hilfsmittel wird bei YouTube auf die Nerd Statistic und bei Netflix auf die allgemeinen Statistiken zurückgegriffen.

Die Limitierung der Datenrate und das Erzwingen einer spezifischen RTT wird mit zwei Netzwerk Emulatoren (Apposite LINKTROPY 5500 [23]) erreicht. Die aufgebaute Infrastruktur besteht aus zwei Apposite LINKTROPY 5500, die genutzt werden, um verschiedene Verbindungen zu simulieren, und einem Linksys WRT3200ACM Router mit OpenWrt (Version 18.06.1 [24]).

Der gesamte Aufbau befindet sich innerhalb des Netzwerks der Hochschule für Technik Rapperswil.

4.2 Testaufbau

4.2.1 WebPageTest Tests

Die vorhin beschriebene Infrastruktur wird für diese Tests um zwei baugleiche Notebooks von Fujitsu und einem PC erweitert. Auf den drei Geräten wird als Betriebssystem Ubuntu in der aktuellsten Version (Version 18.04.1) eingesetzt. Die Tests werden mit WebPageTest durchgeführt. WebPageTest unterscheidet hierbei zwischen zwei Akteuren:

- **Server:** Hostet eine Webseite, auf welcher man via Browser oder per Skript zugreifen kann, um Tests einzuleiten.
- **Agent:** Greift auf den Server zu, um aktuelle Tests für die vorkonfigurierte Location abzurufen. Nach Abschluss des Tests werden die Teststatistiken dem Server übermittelt.

Die beiden Notebooks fungieren dabei als Agents. Der PC führt einen WebPageTest-Server aus, worüber die Agents angesteuert werden. DNS-Caching ist bei diesem Setup auf den Komponenten Router und Client aktiviert. Der Browser selbst arbeitet mit aktiviertem DNS-Caching, welches jedoch nach einem Repeated View Test wieder bereinigt wird [16].

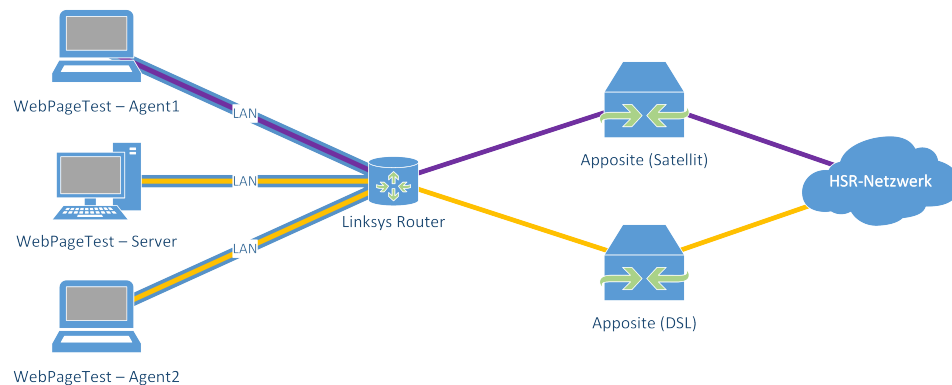


Abbildung 4.1: Aufbau der WebPageTest-Infrastruktur

4.2.2 Streaming Tests

Tests, welche die Streaming-Qualität von einzelnen Streaming Anbietern messen, werden mit einem Notebook von Dell durchgeführt. Darauf läuft die aktuellste Version von Windows (Version 1809). Als Browser wird Firefox mit der aktuellsten Version (Version 63.03) verwendet.

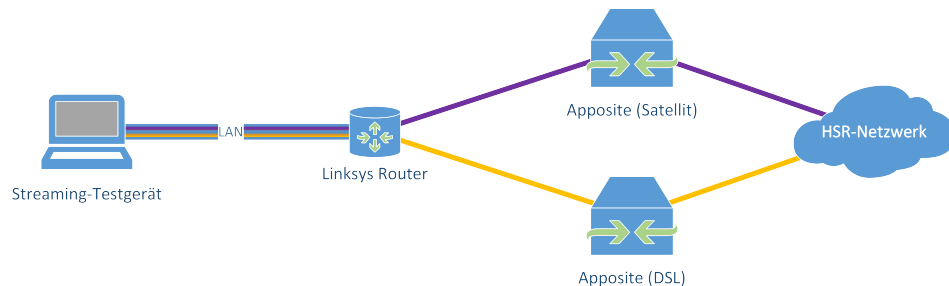


Abbildung 4.2: Aufbau der Streaming Test Infrastruktur

4.3 Testdurchführung

4.3.1 WebPageTest

Die Baseline wird ermittelt, in dem eine Liste mit vordefinierten Webseiten alle drei Stunden durchgetestet wird. Um die Logs besser sortieren zu können, werden auf dem Server die Locations angepasst, sodass folgende Struktur herrscht:

- DSL:
 - DSL_3Mbits_RTT20ms
 - DSL_5Mbits_RTT20ms
 - DSL_10Mbits_RTT20ms

- Satellit:
 - Satellite_3Mbits_RTT600ms
 - Satellite_5Mbits_RTT600ms
 - Satellite_10Mbits_RTT600ms

Hierbei werden die beiden Clients über zwei verschiedene WAN-Ports auf dem LinkSys-Router mit einem statischen Routing geroutet. Hinter den jeweiligen WAN-Ports sind die unterschiedlich konfigurierten Apposites angeschlossen. Jedem Client wird zusätzlich noch in der Agent-Konfiguration eine der oben erwähnten Locations eingetragen. Dies ist für die Testdaten schlussendlich von Nöten, um die Messungen voneinander abzutrennen.

Mittels Python-Skript werden alle drei Stunden Test-Anfragen an den WebPageTest-Server mit der jeweiligen Location und der zu testenden Webseite gesendet. Die Clients detektieren diese Anfragen und starten den jeweiligen Test sequentiell über ihre Local Area Network (LAN)-Verbindung.

Um eine Auswertung der Tests zu ermöglichen wird ein Python-Skript erstellt, welches täglich die Tests in ein Comma Separated Values (CSV)-File zusammenfasst. Das tägliche CSV-File wird anschliessend in die Arbeitsumgebung hochgeladen, sobald keine Tests mehr laufen.

4.3.2 Streaming

Die Baseline für den Streaming Inhalt wird einmalig durchgeführt. Es werden dabei folgende zwei Verbindungstypen behandelt:

- 3 Mbit/s Download, 0.3 Mbit/s Upload über DSL
- 5 Mbit/s Download, 0.5 Mbit/s Upload über Satellit

Die Verbindung über einen bestimmten Kanal wird hierbei durch das Deaktivieren des anderen Interfaces festgelegt.

4.4 Ziel

4.4.1 WebPageTest

Die Messungen zur Ermittlung einer Baseline für die vier Konfigurationen können später dazu verwendet werden, die erarbeitete Lösung auf ihren Nutzen für einen Endbenutzer im Bezug auf das Surferlebnis zu überprüfen.

4.4.2 Streaming

Die Messungen dienen bei den Streaming Tests lediglich als Anhaltspunkt, ob das Streaming über die Satellitenverbindung einen wesentlichen Unterschied zur DSL-Verbindung bei gleicher Geschwindigkeit aufweist. Hierbei wird auf die maximale Auflösung geachtet und wie schnell diese ausgehandelt wird.

4.5 Testresultate

4.5.1 WebPageTest

Vorgehen

Für die folgende Auswertung wird die 'Document Complete - Time' genutzt. Dies kommt daher, dass bei Webseiten, wie zum Beispiel www.youtube.com, Werbung auch in Form von Videos dargestellt werden. Solche Werbungen laden während ihrer Dauer stetig Daten nach, was zu einem höheren Wert bei 'Fully Loaded - Time' führt. Da die so nachgeladenen Daten den Benutzer nicht an der Nutzung der betroffenen Website hindern, ist diese Metrik für eine Aussage zur UX ungeeignet. Die Problematik mit den Videos ist auch der Grund, weshalb die VCT nicht für diese Auswertung herangezogen wird.

Um der Aussagekraft der grafischen Auswertungen nicht zu schaden, wurden Messresultate, welche aufgrund von Verbindungsfehlern und ähnlichem Null-Werte enthielten, nicht berücksichtigt. Ursache und Häufigkeit solcher Fehler werden in einem späteren Kapitel separat behandelt.

Alle grafischen Auswertungen werden um folgende Elemente ergänzt:

- **Rote Linie:** Die rote Linie zeigt die maximal mögliche Download Datenrate an.
- **Grüne Fläche:** Die grüne Fläche weist jenen Bereich aus, in welchem die Ladezeiten eine Abweichung von maximal 10 Sekunden von der roten Linie aufweist.
- **Rote Fläche:** Die rote Fläche weist den Bereich aus, welcher mehr als 10 Sekunden Differenz zum Optimum aufweist.

Der akzeptable Zeitrahmen wurde auf 10 Sekunden festgelegt, da

Es wird dabei nur auf die Testresultate möglicher Bandbreiten eingegangen, welche aktuell oder zukünftig über den jeweiligen Kanal verfügbar sind.

First View

Die grafische Auswertung der Datenmenge in Relation zur Ladezeit für die First View über 3 Mbit/s DSL¹ (Abbildung 4.3) zeigt, dass ein Grossteil der Seitenaufrufe in der erwarteten Zeit (grüne Fläche) lädt. Zudem können vereinzelte Ausreisser und grössere Ansammlungen ausgemacht werden.

¹ Anzahl Messresultate: 2062, Zeitraum der Messungen: 12.10.18 - 14.10.18

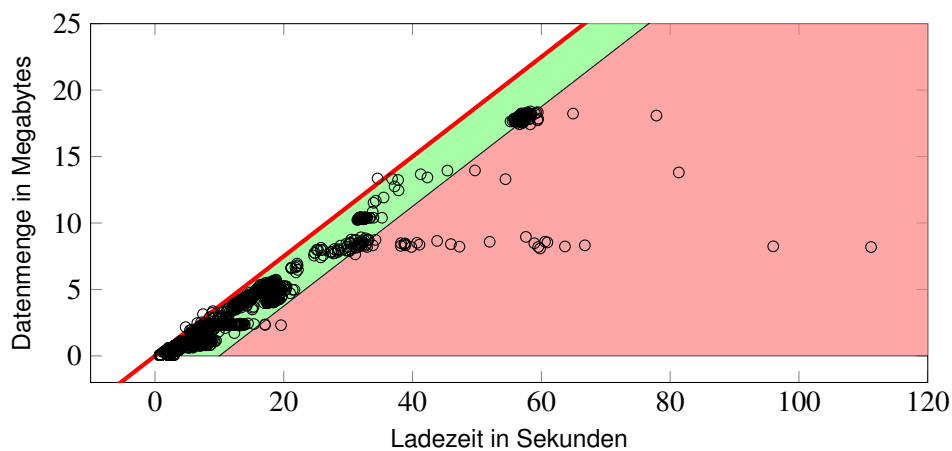


Abbildung 4.3: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über DSL mit 20ms RTT

Die Auswertung der First View Messungen über eine 3 Mbit/s Satellitenverbindung² (Abbildung 4.4) zeigt ein etwas anderes Bild. Anders als noch bei DSL können nur wenige Seiten in der erwarteten Zeit geladen werden. Zudem weisen Resultate mit ähnlichen Datenmengen in Bezug auf die Ladezeit grössere Unterschiede auf. Zuvor schon sichtbare Ansammlungen sind jedoch weiterhin erkennbar.

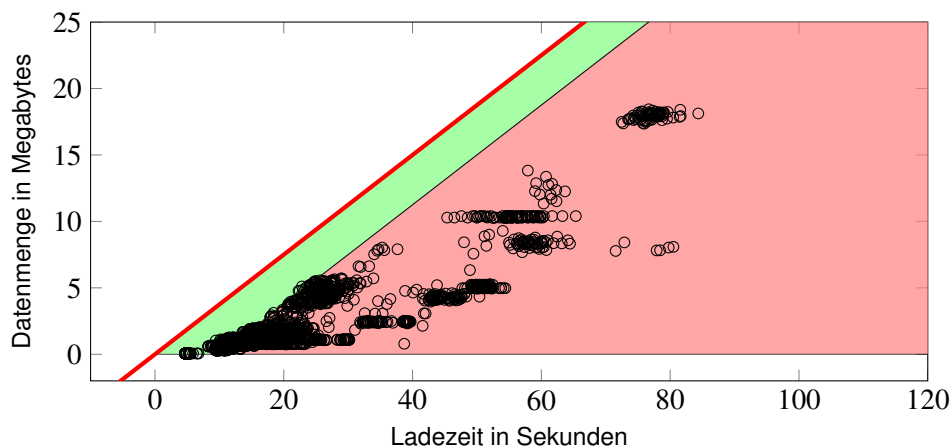


Abbildung 4.4: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Bei First View Messungen über eine 5 Mbit/s Satellitenverbindung³ (Abbildung 4.5) zeigt sich erneut ein ähnliches Bild wie bei 3 Mbit/s über Satellit. Auffällig ist, dass nur eine kleine Verbesserung in Bezug auf die Ladezeit von Webseiten zu erkennen ist. Diese

²Anzahl Messresultate: 2027, Zeitraum der Messungen: 13.10.18 - 15.10.18

³Anzahl Messresultate: 1547, Zeitraum der Messungen: 15.10.18 - 17.10.18

Verbesserung ist entgegen den Erwartungen nicht proportional zur Erhöhung der Datenrate im Vergleich zu den Messungen über die 3 Mbit/s Satellitenverbindung.

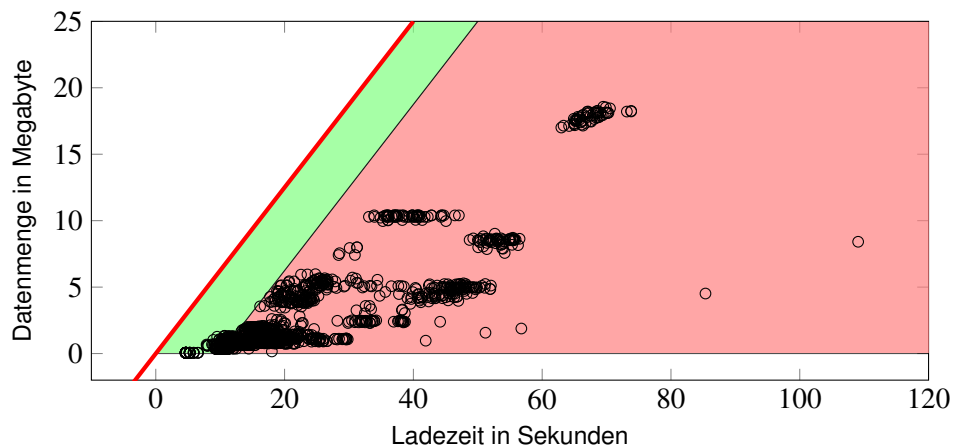


Abbildung 4.5: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 5 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Bei der 10 Mbit/s Satellitenverbindung⁴ (Abbildung 4.6) ist keine signifikante Veränderung zu den Resultaten über 3 Mbit/s und 5 Mbit/s Satellitenverbindungen zu sehen. Die Erhöhung der Datenrate bringt keine massgebliche Verbesserung für die Ladezeiten bei Webseitenaufrufen.

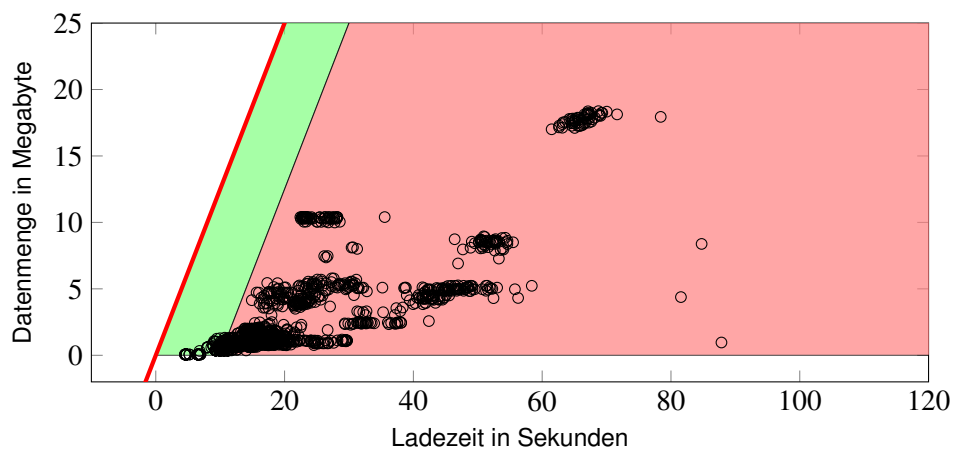


Abbildung 4.6: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 10 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

⁴Anzahl Messresultate: 1469, Zeitraum der Messungen: 15.10.18 - 17.10.18

First View Detailed

Um genauer auf die Auffälligkeiten aus Abschnitt 4.5.1 (First View) eingehen zu können, werden im Folgenden Grafiken dargestellt, welche nur die Daten von Messungen gegen drei Webseiten darstellen. Die Webseiten für diese Darstellungen wurden ausgewählt, da so auf ungewöhnliche Häufungen und Ausreisser eingegangen werden kann.

Die Darstellung der Resultate für Messungen über 3 Mbit/s DSL⁵ (Abbildung 4.7) zeigt, dass sich die Ladezeiten für eine Webseite zwischen den einzelnen Messungen nicht gross verändern. Eine Ausnahme davon ist die Webseite www.20min.ch. Für Messungen der Webseite www.20min.ch ist erkennbar, dass sich zum einen die Ladezeiten bei etwa gleichbleibender Datenmenge verändern und es zum anderen auch Unterschiede von ca. 5 Megabyte (MB) bei der Datenmenge gibt, welche kaum Einfluss auf die Ladezeit der Webseite haben.

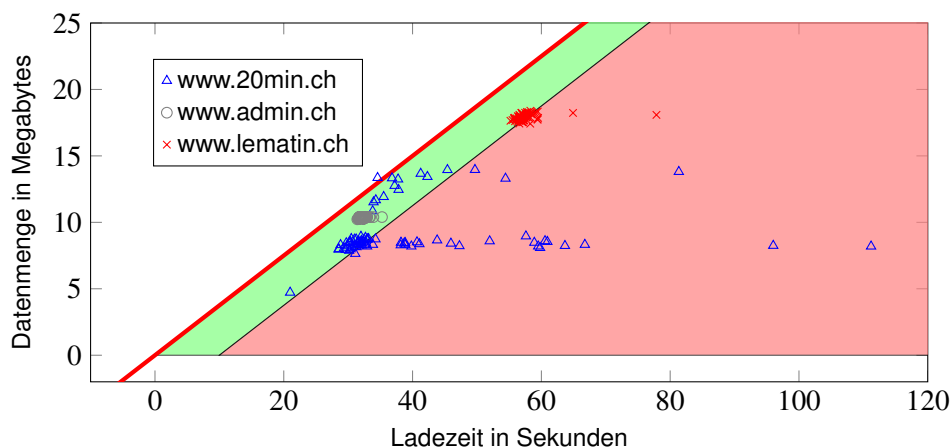


Abbildung 4.7: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 3 Mbit/s über DSL mit 20ms RTT

Die auffälligen Ansammlungen bei Messungen über die 3 Mbit/s Satellitenverbindung⁶ (Abbildung 4.8) sind auf dieselben drei Webseiten zurückzuführen wie in der Abbildung 4.7. Auch gleich verhalten sich die Resultate der Messungen für www.20min.ch, welche erneut eine Ansammlung bei ca. 8 MB und eine bei ca. 13 MB aufweisen. Dass diese Auffälligkeit in beiden Messreihen auftaucht, liegt daran, dass sich der Zeitraum der beiden Messreihen überschneidet und diese Abweichung der Datenmenge genau in dieser Zeitspanne aufgetreten sind. Wie diese Abweichungen zustande kommen wird im Kapitel 4.6 genauer erläutert.

⁵Anzahl Messresultate pro Webseite: ~75, Zeitraum der Messungen: 12.10.18 - 14.10.18

⁶Anzahl Messresultate pro Webseite: ~72, Zeitraum der Messungen: 13.10.18 - 15.10.18

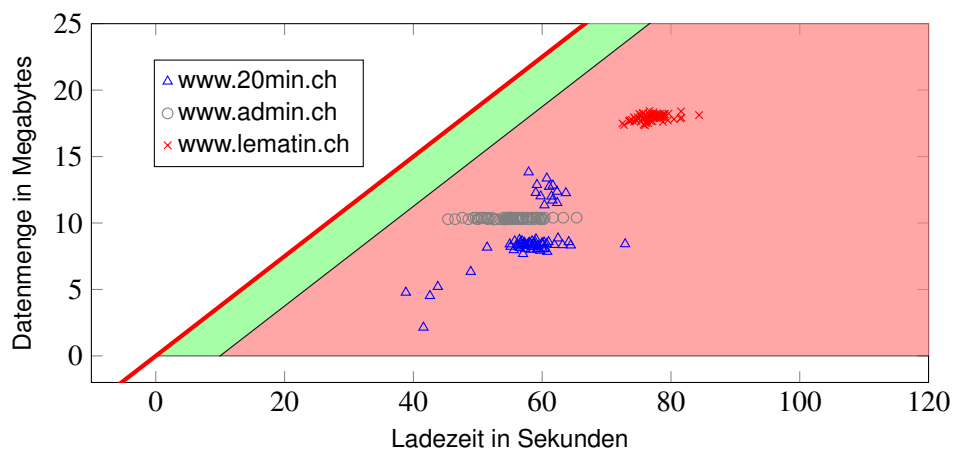


Abbildung 4.8: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Bei den Messungen über eine 5 Mbit/s Satellitenverbindung⁷ (Abbildung 4.9) ist für die Webseite www.20min.ch keine Verteilung auf zwei Ansammlungen mehr zu sehen. Allgemein können kaum mehr Ausreisser beobachtet werden.

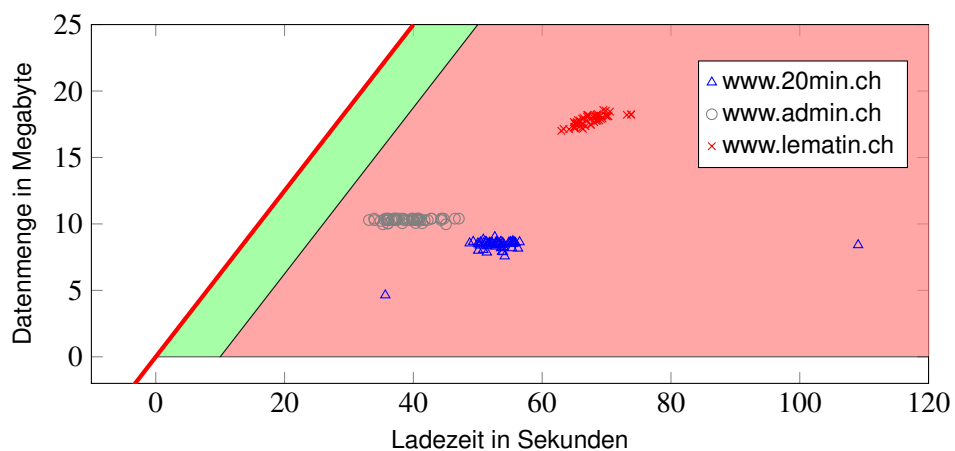


Abbildung 4.9: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 5 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Auch bei Messungen über die 10 Mbit/s Satellitenverbindung⁸ (Abbildung 4.10) sind mit Ausnahme einiger, wenigen Ausreisser keine neuen Auffälligkeiten zu erkennen. Sichtbar ist jedoch, dass es in Bezug auf die Ladezeiten kaum Unterschiede zwischen dieser Messung und der Messung mit 5 Mbit/s, siehe Abbildung 4.9, gibt.

⁷Anzahl Messresultate pro Webseite: ~55, Zeitraum der Messungen: 15.10.18 - 17.10.18

⁸Anzahl Messresultate pro Webseite: ~53, Zeitraum der Messungen: 15.10.18 - 17.10.18

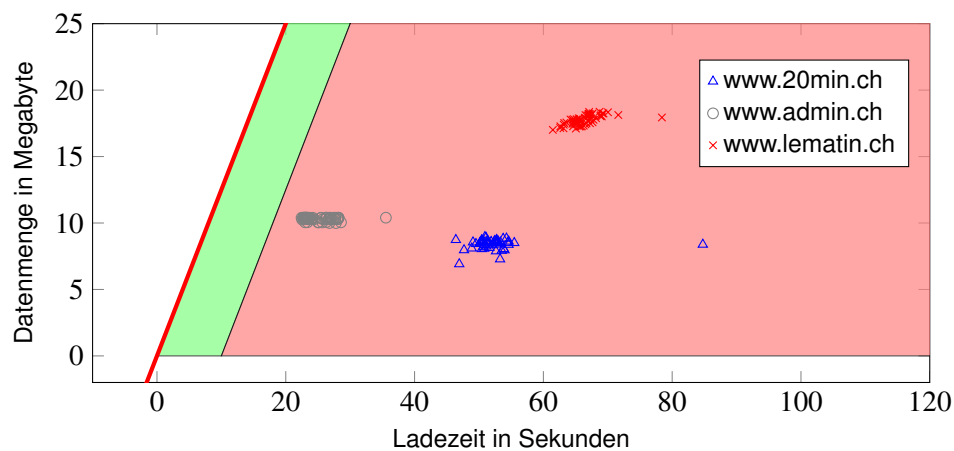


Abbildung 4.10: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 10 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Repeated View

Um aufzuzeigen, wie sich die Ladezeiten bei reduzierter Datenmenge und wiederholtem Laden einer Webseite verhalten, werden auch diese Daten grafisch ausgewertet.

Bei den Resultaten der Messungen über 3 Mbit/s DSL⁹ (Abbildung 4.11) sind mit Ausnahme einer einzigen auffälligen Ansammlung von Messwerten (a) kaum mehr Unterschiede zwischen den Webseiten auszumachen. Die erwähnte Ansammlung ist auf www.admin.ch zurückzuführen. Der Grund dafür, dass sich die Werte in Bezug auf Ladezeit und Datenmenge im Vergleich zu Abbildung 4.7 nicht verändert haben, ist, dass beim ersten Laden der Webseite ein Flag mitgeschickt wird, welches das Caching der Webseite verhindert.

⁹Anzahl Messresultate: 2016, Zeitraum der Messungen: 13.10.18 - 15.10.18

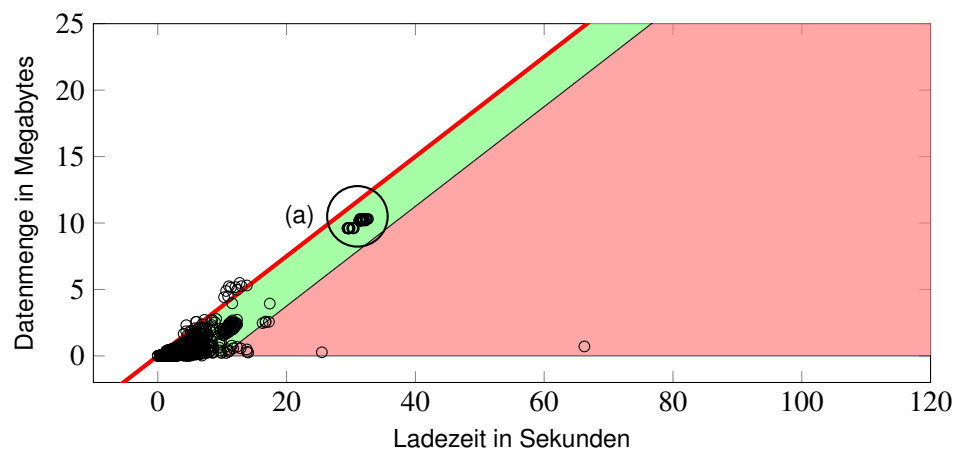


Abbildung 4.11: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über DSL mit 20ms RTT

Messungen über eine 3 Mbit/s Satellitenverbindung¹⁰ (Abbildung 4.12) zeigen grosse Unterschiede in Bezug auf die Ladezeit bei ähnlicher Datenmenge auf. Die Tatsache, dass in der Abbildung 4.11 keine derartig starke Ausprägung dieses Verhaltens zu erkennen ist, lässt darauf schliessen, dass die höhere RTT der Satellitenverbindung im Vergleich zur DSL-Verbindung dafür verantwortlich ist. Auf diesen Einfluss wird im Kapitel 4.7 genauer eingegangen.

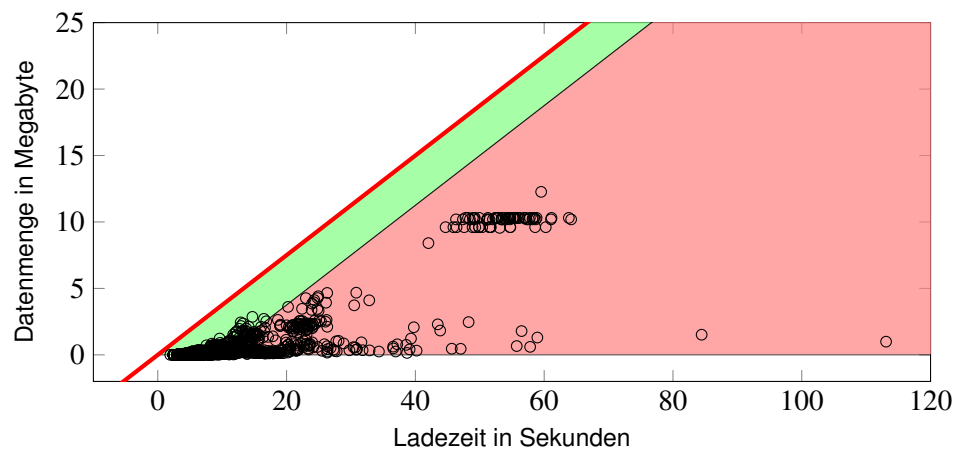


Abbildung 4.12: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Die Messungen betreffend wiederholten Seitenaufrufen über eine 5 Mbit/s Satellitenverbindung¹¹ (Abbildung 4.13) zeigen im Vergleich zu Abbildung 4.12 eine Verbesserung

¹⁰Anzahl Messresultate: 2017, Zeitraum der Messungen: 14.10.18 - 16.10.18

¹¹Anzahl Messresultate: 1409, Zeitraum der Messungen: 15.10.18 - 17.10.18

der Ladezeiten. Zudem ist eine Verkleinerung der Spanne in Bezug auf die Ladezeit in der Ansammlung mit einer Datenmenge von ca. 10 MB erkennbar.

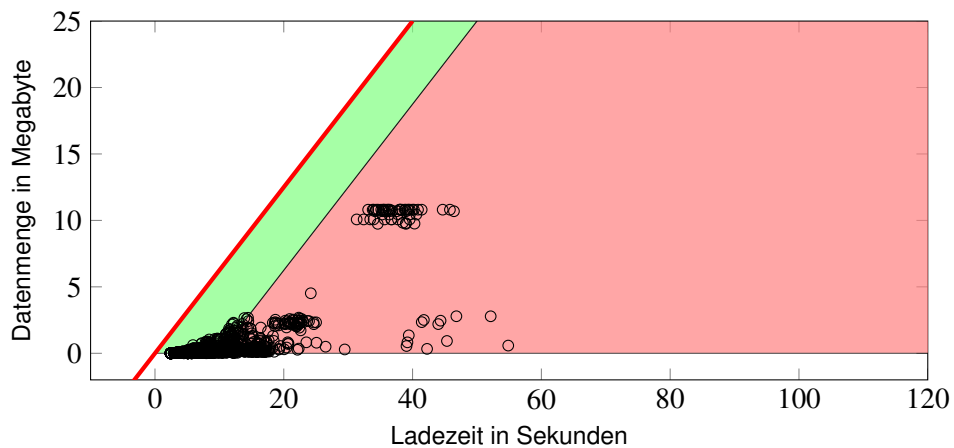


Abbildung 4.13: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 5 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

Bei Messungen über eine 10 Mbit/s Satellitenverbindung¹² (Abbildung 4.14) ist eine weitere Verdichtung der Ansammlungen im Vergleich zu Abbildung 4.13 sichtbar. Zudem haben sich die Ladezeiten für die Ansammlung von Resultaten bei ca. 10 MB weiter verbessert.

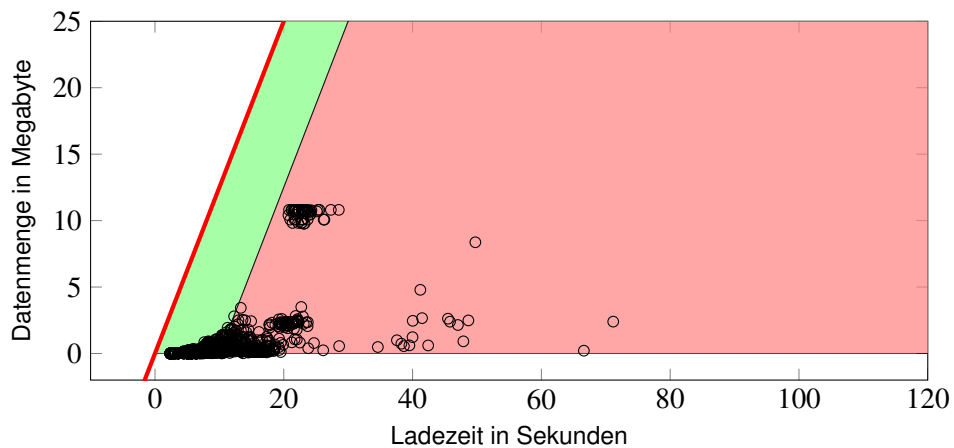


Abbildung 4.14: figure
Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 10 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT

¹²Anzahl Messresultate: 1404, Zeitraum der Messungen: 15.10.18 - 17.10.18

4.5.2 Streaming

Wie es zu erwarten war, hat die Bandbreite einen wesentlichen Einfluss auf die Aushandlung der maximalen Auflösung eines gestreamten Videos. Die höhere RTT hat den Nachteil, dass die Aushandlung der maximal möglichen Auflösung länger dauert. Die Tests zeigen, dass über einen Link mit höherer Bandbreite eine bessere Auflösung erzielt werden kann. Die DSL-Verbindung kann lediglich eine maximale Auflösung von 480p liefern. Die Satellitenverbindung kann eine 720p Auflösung zur Verfügung stellen. Eine höhere Auflösung wirkt sich positiv auf die UX aus, wie im Kapitel 4.8.2 ersichtlich ist.

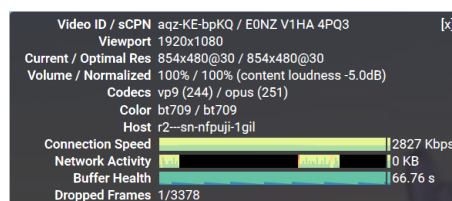


Abbildung 4.15: Test 3 Mbit/s über DSL-Verbindung mit 20 ms RTT

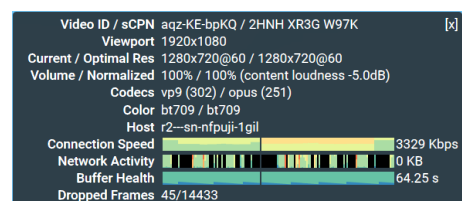


Abbildung 4.16: Test 5 Mbit/s über Satellit mit 600 ms RTT

4.6 Einfluss von Werbung

In den Abbildungen 4.7 und 4.8 ist bei den Resultaten der Messungen für www.20min.ch zu erkennen, dass sich neben der grössten Ansammlung bei einer Datenmenge von ca. 8 MB eine weitere Ansammlung bei ca. 14 MB abzeichnet. Diese zweite Ansammlung kann auf zusätzliche Werbungen zurückgeführt werden. In den hier ersichtlichen Fällen wurde jeweils ein zusätzliches Werbe-Banner zu Beginn der Website eingeblendet.

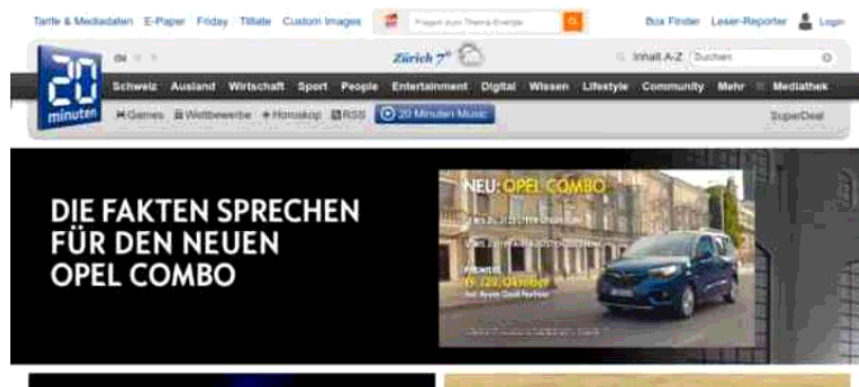


Abbildung 4.17: Grosse Werbeeinblendung auf www.20min.ch am 15.10.2018

Allein diese Einblendung trägt jeweils ca. 4 MB zusätzliche Datenmenge bei einem Seitenaufruf bei. Die Erhöhung der Datenmenge durch Werbung scheint jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ladezeit zu haben. Da aber der Platz für die Werbung als

weisser Block sichtbar ist, bis die Werbung vollständig geladen ist, wirkt sich dies dennoch negativ auf die UX aus. Diese Auffälligkeiten können in den Messresultaten jeweils nur über einen kurzen Zeitraum von wenigen Tagen beobachtet werden. Während unserer Messungen sind zweimal solche Werbeeinblendungen aufgetreten. Beide Male auf www.20min.ch und über einen Zeitraum von ca. zwei Tagen.

4.7 Einfluss der RTT

Die RTT hat einen starken Einfluss auf die Dauer der einzelnen Abfragen bei einem Aufruf einer Webseite. Beim Abrufen einer Webseite werden die benötigten Elemente einzeln vom Client angefragt. Der Server sendet danach als Antwort nur das jeweils angefragte Element. Sobald mehrere Elemente nacheinander geladen werden müssen, da sie in Abhängigkeit zueinanderstehen, wird sich die RTT aufsummieren und somit die Ladezeit wesentlich verschlechtern. Bei Webseiten ist dies öfters der Fall, dass keine parallelen Anfragen gestellt werden. Dies hat zur Folge, dass Webseiten mit viel Elementen eine wesentlich höhere Ladezeit haben als solche mit wenigen Elementen, bei gleicher Gesamtgrösse.

HTTP/2 bietet hierfür einen grossen Vorteil. Durch das neue Feature *Server Push* bietet sich die Möglichkeit Elemente direkt an einen Client zu senden, auch wenn der Client diese Elemente noch nicht angefragt hat. Dadurch lässt sich die Hälfte der RTT pro nachgeladenem Element sparen, da das Request-Response-Verfahren dieser Elemente entfällt. [25]

4.8 Zusätzliche Erkenntnisse

4.8.1 Unterschiede zwischen 5 Mbit/s und 10 Mbit/s

Am Beispiel der Resultate von Messungen der Webseite www.20min.ch¹³ zeigt sich, dass nur ein kleiner Unterschied betreffend dem Median der Messungen mit 5 Mbit/s und 10 Mbit/s Satellitenverbindungen besteht. Die Differenz zwischen den Medianen bei 5 Mbit/s und 10 Mbit/s über Satellit beträgt weniger als 1 Sekunde. Die Messungen über die 5 Mbit/s Verbindung weisen jedoch eine etwas höhere Spanne der Ladezeiten auf.

¹³Anzahl Messresultate pro Messreihe: 54 - 72, Zeitraum der Messungen: 13.10.18 - 17.10.18

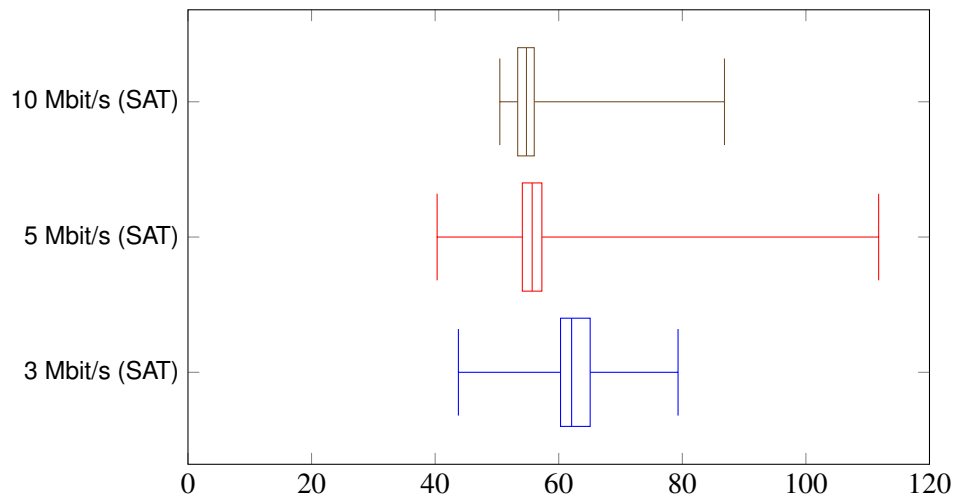


Abbildung 4.18: Dauer der Seitenaufrufe über Satellit auf www.20min.ch in Sekunden

Um zu überprüfen, ob sich dieses Verhalten auch bei Seitenaufrufen über DSL zeigt, werden zusätzlich zur bestehenden Messreihe über 3 Mbit/s DSL noch Messungen mit Datenraten von 5 Mbit/s und 10 Mbit/s gemacht¹⁴. Für die Aufrufe der Webseite www.20min.ch zeigt sich ein für die Messungen über DSL ähnliches Bild wie in der Abbildung 4.18. Zwischen den Medianen der 5 Mbit/s und der 10 Mbit/s Messung besteht eine Differenz von weniger als 0.5 Sekunden. Es ist jedoch erkennbar, dass die Messresultate über die 10 Mbit/s Verbindung weniger Ausreisser mit langen Ladezeiten aufweisen.

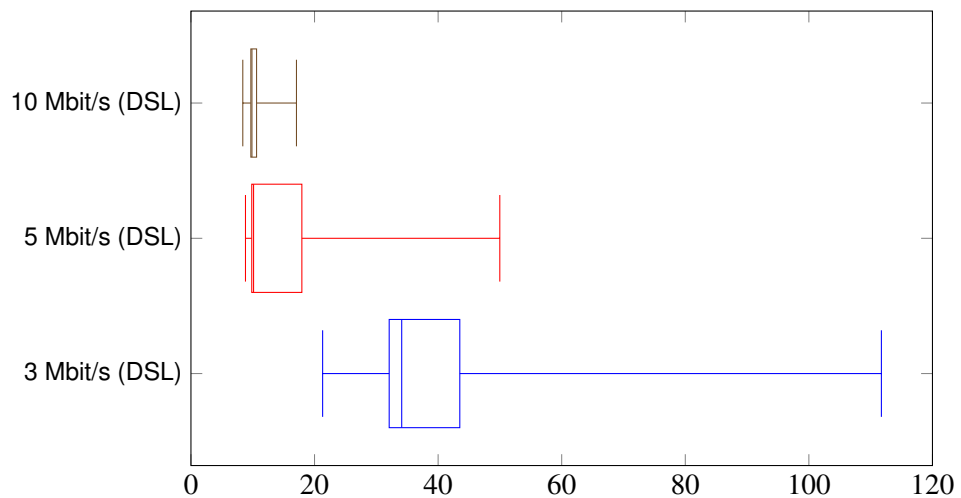


Abbildung 4.19: Dauer der Seitenaufrufe über DSL auf www.20min.ch in Sekunden

¹⁴Anzahl Messresultate pro Messreihe: 73 - 105, Zeitraum der Messungen: 12.10.18 - 14.10.18 / 01.11.18 - 03.11.18

Dasselbe Bild zeigt sich, wenn die Mediane der Messungen einzelner Webseiten¹⁵ verglichen werden. Dafür wird die Differenz eines Medians zum Median derselben Webseite bei Messungen über die 3 Mbit/s DSL Verbindung ermittelt. Danach werden die so erhaltenen Abweichungen für die sechs unterschiedlichen Testkonfigurationen gemittelt.

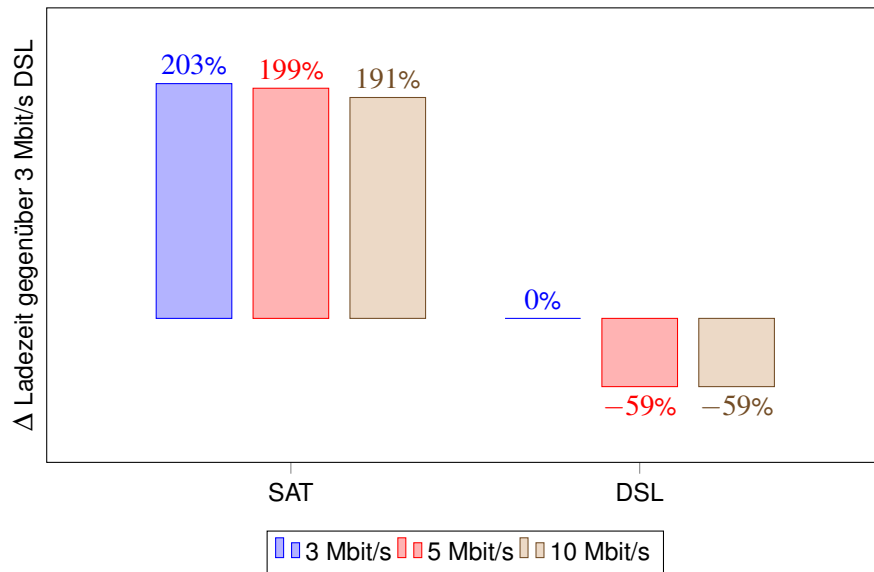


Abbildung 4.20: Δ der durchschnittlichen Ladezeit im Vergleich zu 3 Mbit/s DSL

Es zeigt sich, dass, sowohl bei Messungen über DSL als auch bei Messungen über Satellit, zwischen den Ladezeiten über 5 Mbit/s und 10 Mbit/s kaum eine Differenz besteht.

4.8.2 Einfluss von Auslösung auf die Streaming-UX

Videos mit einer höheren Auslösung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Streaming-UX. Durch die detailliertere Darstellung von einem Frame mit 720p Auflösung, wirkt das Bild frischer und lebendiger als ein Frame von einer 480p Auflösung.

¹⁵Anzahl Messresultate pro Messreihe: 1496 - 2673,
Zeitraum der Messungen: 12.10.18 - 17.10.18 / 01.11.18 - 03.11.18

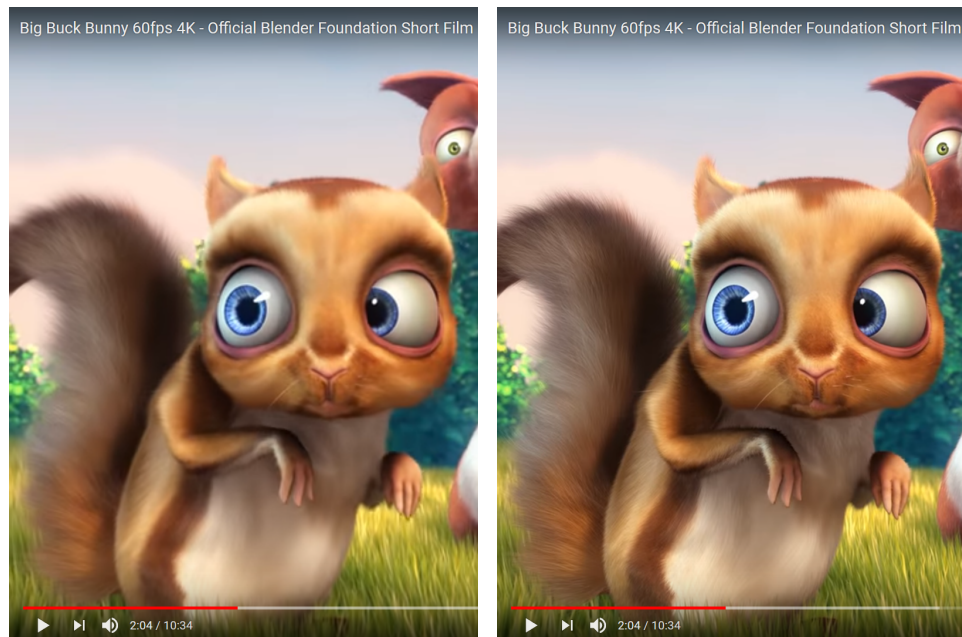


Abbildung 4.21: Frame eines Videos [26] mit einer Auflösung von 480p links und 720p rechts.

Netflix bietet zudem maximal nur eine Auflösung von 720p für gewisse Browser an [27]. Somit kann sich die UX bei Netflix-Streaming unter gewissen Voraussetzungen nicht verbessern. Trotzdem kommt es stark darauf an, auf welche Distanz man die Videos betrachtet. Bei Videos mit einer niedrigen Auflösung kann das menschliche Auge Pixel besser erkennen als bei einer höheren Auflösung bei gleicher Distanz.

4.8.3 Videokomprimierung

Für Videos, bei welchen eine hohe Komprimierung möglich ist, kann eine bessere Auflösung erzielt werden. In den unteren Abbildungen ist zu sehen, dass die Auflösung von 720p bei der dunklen Szenerie schnell erreicht wurde. Der Stream mit vermehrt helleren Szenen kommt nicht an die 720p heran und bleibt bei 480p stehen. Der Throughput ist jedoch bei beiden Streams derselbe.



Abbildung 4.22: Test 3 Mbit/s über DSL-Verbindung mit 20 ms RTT. Serie mit vermehrt heller Szenen und somit niedrigerer Komprimierung.

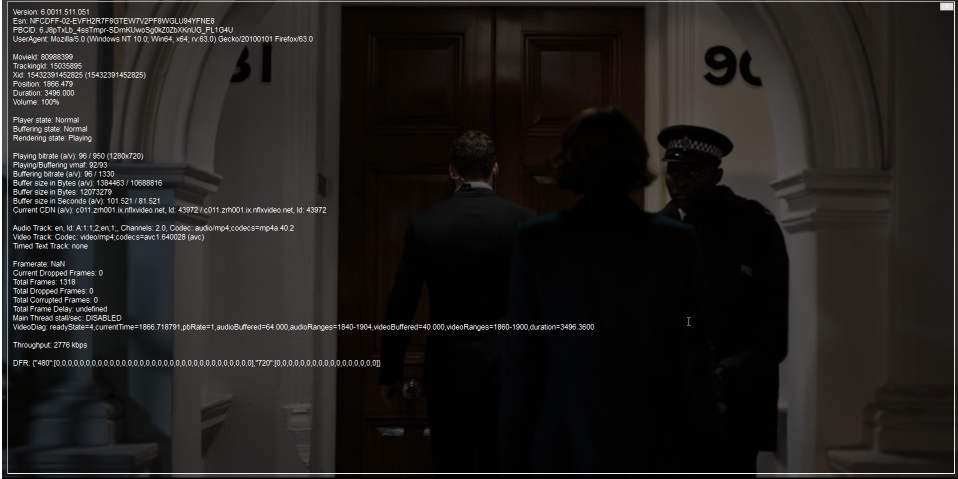


Abbildung 4.23: Test 3 Mbit/s über DSL-Verbindung mit 20 ms RTT. Serie mit vermehrt dunkler Szenen und somit höherer Komprimierung.

YouTube testet zudem aktuell den neuen Standard AV1 [28], welcher von der Alliance for Open Media entwickelt wird. Google, somit auch YouTube, Netflix, Amazon und Microsoft gehören dieser Allianz an [29]. Der neue AV1 Codec verspricht dabei eine um 30% bessere Kompression der Inhalte [30]. Dies bietet in Zukunft eine bessere UX dank höherer Auflösung bei gleicher Bandbreite. Da der Standard auch lizenzfrei ist [31], wird sich dadurch auch eine breite Streuung und Nutzung erhofft.

5 Entscheidungen Dual-WAN

5.1 Fair usage policy

Die Fair use policy (FUP) der Swisscom wird in der Umsetzung nicht behandelt. Die FUP der Swisscom beinhaltet, dass die Bandbreite auf ein Minimum reduziert wird, sobald der Endkunde mehr als 16 Gigabyte (GB) über 4 Wochen an Daten bezieht. Während den Nachtstunden von 22:00 Uhr bis 08:00 Uhr wird die FUP jedoch nicht angewendet. Die Begrenzung der Bandbreite bleibt bestehen, bis der Konsum wieder aus dem Grenzwert von 16 GB über 4 Wochen fällt. [32]

Es ist zudem davon auszugehen, dass man durch die vermehrte Nutzung von Streaming-Diensten und die höhere Bandbreite über den Satellit in Zukunft mehr Daten konsumieren würde. Dadurch würde man schneller und öfters über den Schwellwert der FUP hinauslaufen. Dies hätte zur Folge, dass der Endkunde vermehrt eine minimale Bandbreite über den Satellit erhalten würde und somit die UX über einen längeren Zeitraum leidet.

5.2 Routing

5.2.1 Regeln

Mit den Baseline-Tests konnten folgende Punkte festgestellt werden:

- Für das Laden von Webseiten ist eine geringere RTT viel stärker gewichtet als eine höhere Bandbreite. Dies zeigt die Abbildung 4.20 gut auf.
- Eine hohe RTT zieht keine negativen Faktoren für die Bildqualität beim Streaming von Video Content nach sich. Einzig die Dauer, bis eine konstante Bildqualität gegeben ist, wird durch eine geringere RTT verbessert.
- Bei DNS-Anfragen ist eine geringere RTT besser, um schneller die Domainnamen aufzulösen und somit auch schneller Content von den Servern beziehen zu können.

Voice over IP (VoIP)-Telefonie benötigt schon von Grund auf eine geringe RTT, um eine optimale UX zu gewährleisten [33].

Um ein solch angestrebtes Regelset für das Routing zu ermöglichen, werden zwei Sub-interfaces erstellt, welche auf zwei verschiedene physikalische Ports gemappt werden. Darüber lassen sich dann die gewünschten Regeln anwenden.

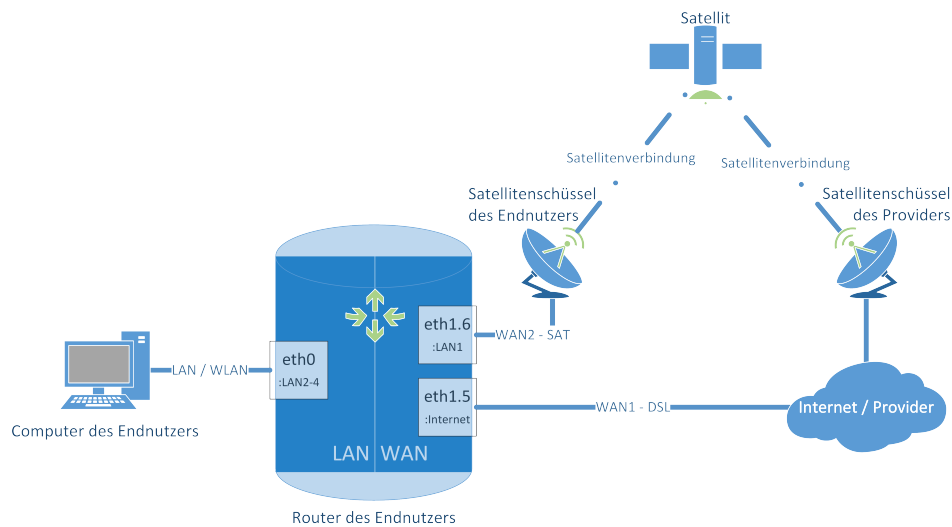


Abbildung 5.1: Logische Verbindung zwischen logischen Interfaces und physischen Ports des Routers

Dadurch ergibt sich folgendes generelles Regelset für die Verteilung des Traffics. Für das einfachere Administrieren soll das First-Match Prinzip für das Regelset angewendet werden. Das First-Match Prinzip basiert darauf, dass immer die erste, passende Regel bei einem einkommenden, nach aussen gehendem Paket angewendet wird.

Verbindungsart	WAN-Kanal	WAN-Interface
Video-Streaming Dienste	Satellit	WAN2
DNS	DSL	WAN1
Standardverhalten	DSL	WAN1

Tabelle 5.1: Regeln des Routings

5.2.2 Streaming Provider

Für die Umsetzung wird eine Liste von Streaming-Providern erstellt. Es benötigt lediglich eine Liste von Streaming-Providern, da das Routing keine weiteren Listen benötigt. Da es aber eine Vielzahl von Streaming-Anbietern gibt, wird für die Umsetzung nur eine kleine Gruppe an Providern abgedeckt. Die Liste umfasst hierbei die grössten Anbieter in dieser Sparte. Für die produktive Umsetzung soll jedoch darauf geachtet werden, dass auch kleine Provider berücksichtigt werden, um die Netzneutralität zu wahren.

5.3 Failover

Beim Ausfall eines Links soll die zweite Verbindung zum Provider genutzt werden. Hierzu werden Schwellwerte eingesetzt. Mithilfe diesen Schwellwerten ist es möglich dem Router zu zeigen, dass ein Kanal nicht mehr eine aktive Route zum Provider bereitstellen

kann. Hierfür werden simple Ping Pakete an gewisse IPs versendet. Sofern über einen definierten Zeitrahmen keine Antworten mehr eintreffen, wird der Link als down definiert. Ping Pakete werden jedoch weiterhin über den Kanal versendet, um den Wiederaufbau der Verbindung detektieren zu können.

6 Lösungsvorschlag

6.1 Packages

Für die Umsetzung der geplanten Lösung werden folgende Paket benötigt:

- dnsmasq-full (Version: 2.80-1) [34]
- luci-app-mwan3 (Version: git-18.340.83383-3dea6b5-1) [35]

Hierbei ist anzumerken, dass auf einem frisch installierten OpenWrt System bereits eine Version von dnsmasq vorhanden ist, diese Version jedoch die benötigten IPSets nicht unterstützt.

6.2 IP-Set

Um Routing-Entscheide möglichst dynamisch zu halten, sollen IP-Sets eingesetzt werden. Für jedes IP-Set können Domains definiert werden, deren IPs nach einem erfolgreichen DNS-Request in das IP-Set geschrieben werden. So können Routing-Entscheide basierend auf IP-Sets auch weiter funktionieren, wenn sich die IPs der Server einer Domain ändern. Basierend auf den Entscheidungen aus Kapitel 5 soll nur ein einzelnes IP-Set definiert werden, welches die Domains bzw. Sub-Domains der Content Delivery Networks (CDNs) für Streaming-Dienste abdecken. Für diese Arbeit wird folgende Liste mit CDNs berücksichtigt:

- .googlevideo.com (YouTube)
- .nflxvideo.net (Netflix)
- .zahs.net (Zattoo)
- .iptv.ch (Wilmaa)
- .akamaihd.net (SRF, RTS und weitere)
- .phncfdn.com (Pornhub)
- . xnxx-cdn.net (XNXX)

6.3 MAC-VLAN

Um das Interface für den Satellitenlink abschalten und dennoch die Satellitenverbindung als Fallback nutzen zu können, muss das Interface logisch geteilt werden. Dies wird durch den Einsatz eines Media Access Control (MAC)-Virtual LAN (VLAN) ermöglicht. Das Interface wird damit in zwei logische Interfaces mit unterschiedlichen MAC-Adressen geteilt. Der Nachteil dieses Lösungsansatzes ist, dass beide logischen Interfaces eine eigene öffentliche IP-Adresse benötigen. Ob genügend IPs auf einem Anschluss vergeben werden können, ist abhängig vom Provider.

Für die Umsetzung dieser Studienarbeit wurde jedoch nicht auf MAC-VLAN gesetzt, da der Provider aktuell nur eine IP-Adresse zulässt.

6.4 MWAN3

Die gesamte Logik des Dual-WAN wird mithilfe des Pakets MWAN3 gesteuert.

6.4.1 MWAN Interfaces

Die MWAN Interfaces bauen auf den Interfaces auf, welche physikalisch oder logisch zur Verfügung stehen. Für jedes MWAN Interface kann angegeben werden, ob die Verfügbarkeit zum Provider geprüft werden soll. Sofern dies gewünscht wird, kann auch eingestellt werden, wie oft diese Überprüfung stattfinden sollte.

Für diese Umsetzung sollen drei MWAN Interfaces genutzt werden.

- wan1: An dieses Interface wird der DSL-Link angeschlossen
- wan2: An dieses Interface wird der Satelliten-Link angeschlossen

6.4.2 MWAN Members

Ein MWAN Member basiert auf einem MWAN Interface. Dabei werden zusätzlich eine Metrik und eine Gewichtung angegeben. Bei diesem Lösungsansatz werden für wan1 und wan2 je zwei Members benötigt.

- wan1
 - Metrik: 1, Gewichtung: 3
 - Metrik: 2, Gewichtung: 3
- wan2
 - Metrik: 1, Gewichtung: 3
 - Metrik: 2, Gewichtung: 3

6.4.3 MWAN Policies

Die MWAN Policies bestehen aus einem oder mehreren MWAN Members. Members innerhalb einer Policy führen Loadbalancing aus, wenn sie dieselbe Metrik konfiguriert

haben. Der Verkehr wird entsprechend dem Verhältnis der jeweiligen Gewichtung verteilt. Sofern die Metriken der Members einer Policy unterschiedlich sind, wird jeweils das aktive Interface mit der kleinsten Metrik verwendet.

- streaming
 - Interface: wan2, Metrik: 1, Gewichtung: 3
 - Interface: wan1, Metrik: 2, Gewichtung: 3
- default
 - Interface: wan1, Metrik: 1, Gewichtung: 3
 - Interface: wan2, Metrik: 2, Gewichtung: 3

6.4.4 MWAN Rules

Mit den MWAN Rules können Regeln definiert werden, mit welchen, abhängig von IP-Adressen und Ports der Quelle oder des Ziels, verschiedene MWAN Policies genutzt werden. Zudem können die Regeln auf gewisse Protokolle eingeschränkt werden. Für diesen Lösungsansatz werden drei MWAN Rules verwendet:

- streaming_rule_tcp
 - Destination Port: 80, 443
 - Matching IP-Set: streaming
 - Protocol: tcp
 - Policy: streaming
- streaming_rule_udp
 - Destination Port: 80, 443
 - Matching IP-Set: streaming
 - Protocol: udp
 - Policy: streaming
- default_rule
 - Destination address: 0.0.0.0/0
 - Protocol: all
 - Policy: default

Bei den Streaming Rules wird der neue Standard QUIC berücksichtigt. YouTube nutzt den normalen HTTPS-Port 443 für die Datenübertragung über UDP. Da MWAN3 nur ein Protokoll (oder den Wert "all") pro Rule erlaubt[36], müssen zwei Rules für das Video-Streaming erstellt werden. Hier ist Vorsicht geboten. Das User Interface (UI) verhindert die Eingabe einer mit Kommas getrennten Liste von Protokollen nicht. Unsere Erfahrungen zeigen jedoch, dass Regeln mit mehreren Protokollen bei Routing-Entscheiden ignoriert werden.

7 Reale Tests

Um die Erkenntnisse, welche mit Messungen über simulierte DSL- und Satelliten-Verbindungen gewonnen wurden, zu validieren, werden zusätzliche Tests hinter realen Anschlüssen durchgeführt. Zu diesem Zweck stehen in den Räumlichkeiten der Firma cnlab itr ag ein 5 Mbit/s DSL-Anschluss und ein 3 Mbit/s (effektiv 3.3 Mbit/s) Satelliten-Anschluss zur Verfügung.

7.1 Satellit

Die Messresultate¹ zeigen, dass die von der Swisscom ausgegebene Anschlussbox für den Satelliten-Anschluss DNS-Antworten zwischenspeichern. Aufgrund dieser Erkenntnis sind die Resultate in Abbildung 7.1 und 4.4 nicht ohne weiteres Vergleichbar.

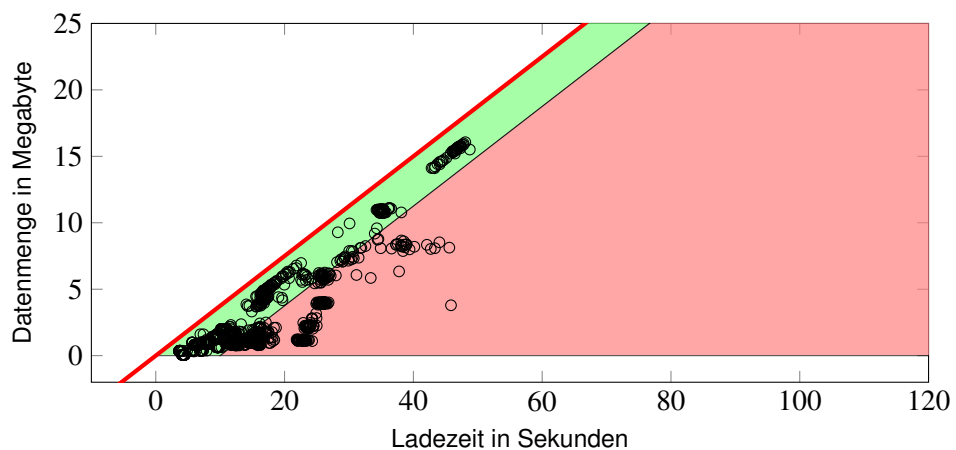


Abbildung 7.1: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit realer RTT

¹ Anzahl Messresultate: 1290, Zeitraum der Messungen: 10.12.2018 - 13.12.2018

7.2 DSL

Wie bereits bei den Messungen über eine simulierten 3 Mbit/s DSL-Verbindung sind die Resultate der Messungen über eine reale DSL-Verbindung² linear angeordnet. Einige der Resultate sind in der Darstellung auf der linken Seite der roten Linie zu finden. Dies ist damit zu erklären, dass auch dieser Anschluss effektiv eine höhere maximale Datenrate hat als angegeben wird.

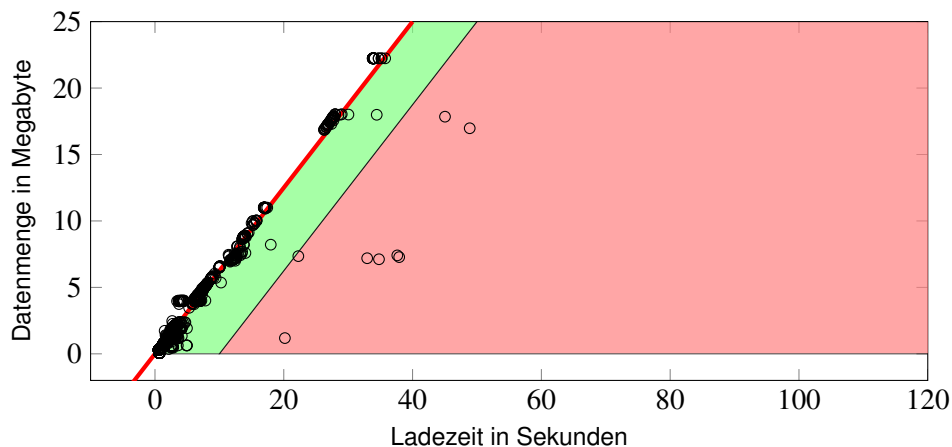


Abbildung 7.2: Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 5 Mbit/s über DSL mit realer RTT

7.3 Unterschiede zu simulierten Verbindungen

7.3.1 DNS-Anfragen

Anders als erwartet und somit in den Baseline-Tests simuliert, scheint die Anschlussbox der Satellitenverbindung DNS-Anfragen zu beschleunigen. So wurden in Tests DNS-Anfrage in ca. 13 ms beantwortet, was weit unter den erwarteten Zeiten von über 600 ms bei einer Satellitenverbindung liegt. Wie diese Differenz zustande kommt, kann in dieser Arbeit leider nicht abschliessend beantwortet werden und müsste weiter untersucht werden.

7.3.2 Bandbreite

Bei den Baseline Tests wurden Messungen mit der Geschwindigkeit von 3 MBit/s durchgeführt. Die effektive Geschwindigkeit auf der realen Satelliten-Verbindung beläuft sich jedoch auf 3.3 Mbit/s. Dies kommt daher, dass die Swisscom so die versprochenen 3 Mbit/s besser einhalten werden können.

²Anzahl Messresultate: 1251, Zeitraum der Messungen: 03.12.2018 - 04.12.2018

7.3.3 Ladezeiten von Webseiten über Satellit

Die Ladezeiten von Tests auf jeweilig gleiche Webseiten variieren stark. In den WebPageTests wurde festgestellt, dass das Traffic Shaping seitens des Satelliten-ISP verspätet anzieht. Das Traffic Shaping ist gut innerhalb von (b) ersichtlich. Die grüne Linie der Bandbreite orientiert sich stark an der blauen Linie, welche die 3.3 Mbit/s widerspiegelt. Dieses verspätete Traffic Shaping hat zur Folge, dass es mehrere Peaks (a) gibt, welche stark von der eigentlichen, versprochenen Bandbreite nach oben abweichen. Anstelle der 3.3 Mbit/s (c) wurden Geschwindigkeiten von bis zu 18.3 Mbit/s erreicht. Somit wurde zwischenzeitlich mehr als fünf Mal so viel Bandbreite erlaubt. Dadurch verändert sich die Ladezeit einer Webseite immens. Es wurde festgestellt, dass bis zu 1/3 schnellere Ladezeiten durch dieses Verhalten erzielt wurden.

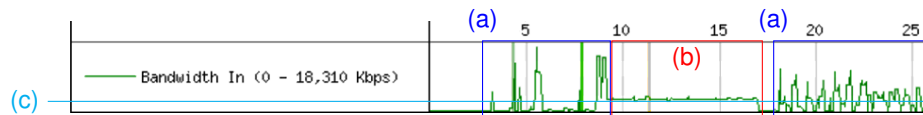


Abbildung 7.3: Peaks von der Bandbreite bei der Satelliten-Verbindung

8 Auswertung

8.1 Ausgangssituationen für Endkunden

Bei den Kunden, welche mit der minimalen Bandbreite der Grundversorgung ans Internet angebunden sind, gelten folgende Ausgangssituationen:

- DSL-Verbindung mit 2 Mbit/s Bandbreite
- Satelliten-Verbindung mit 3 Mbit/s Bandbreite
- DSL-Verbindung in Kombination mit einer Satelliten-Verbindung mit nur 3 Mbit/s Bandbreite

8.1.1 Situation 1 (S1) - Reine DSL-Verbindung

Der Kunde hat durch die Grundversorgung eine einfache DSL-Verbindung erhalten. Durch die mögliche Erhöhung der minimalen Bandbreite der Grundversorgung, müsste der Kunde neu über die Satellitenverbindung ins Internet gehen, sofern die DSL-Verbindung die höher geforderte Bandbreite nicht liefern könnte.

8.1.2 Situation 2 (S2) - Reine Satelliten-Verbindung

Der Kunde ist aktuell schon über eine Satelliten-Verbindung mit dem Internet verbunden. Eine DSL-Verbindung ist nicht möglich, da kein Kupferkabel bis zum Endbenutzer gelegt werden konnte. Beispielsweise sind einige SAC- oder Alphütten nur mit einer Satellitenverbindung mit dem Internet verbunden, da kein ausreichendes 3G- oder 4G-Netzwerk vorhanden ist [37].

8.2 Personas

Um sich besser mit dem jeweiligen Benutzer identifizieren zu können, sind Personas erstellt worden, welche mögliche Situationen aufzeigen.

8.2.1 Persona 1 (P1) - Surfer

Alter: 37

Beruf: Leiterin einer SAC-Hütte

Vreni Müller stellt ihren Gästen öfters einen Laptop zur Verfügung, über welchen man die aktuellsten Nachrichten über Webseiten abrufen kann, da die Abdeckung des Mobilnetz nicht bis zu ihrer SAC-Hütte reicht.

8.2.2 Personal 2 (P2) - Streamer

Alter: 35

Beruf: Leiter einer SAC-Hütte

Pascal Amacker streamt abends gern noch eine oder zwei Episoden seiner Lieblingsserie über Netflix. Zudem schaut er häufig Do it yourself (DIY)-Videos auf YouTube.

8.2.3 Persona 3 (P3) - Familienhaushalt Streamer und Surfer

IP-TV-Streamer

Alter: 54 / 55

Beruf: Besitzer einer Alphütte

Barbara und Urs Manetsch verbringen die Sommermonate mit der Familie auf der Alp. Am Abend ist sind die beiden froh, wenn sie über die Geschehnisse der Welt durch die Tagesschau oder 10 vor 10 informiert werden. Hierfür besitzen sie ein Tablet, welches den SRF Player installiert hat.

Viel-Surfer

Alter: 23

Beruf: Studentin in Richtung Computerlinguistik

Nicole Manetsch verbringt während den Semesterferien die Zeit in der Alphütte ihrer Eltern. Um den gelernten Unterrichtsstoff nicht zu vergessen, repetiert sie diesen auch auf der Alp. Wie die Eltern hat sie erst am Abend dafür Zeit. Mithilfe von Google Scholar oder Wikipedia recherchiert sie über einzelne Themen. Über die Schulplattform Moodle ruft sie zusätzlich noch Foliensätze oder Beispielsprüfungen ab.

8.2.4 Zukünftige Erschliessung

Durch die gegebenen Ausgangssituationen und Personas ergibt sich eine folgende Matrix, welche aufzeigen soll, in wie fern sich eine Dual-WAN-Lösung auszahlt. Dabei wird die UX der jeweiligen Personas begutachtet.

	P1 / S1	P1 / S2	P2 / S1	P2 / S2	P3 / S1	P3 / S2
+ DSL 2 Mbit/s (S1)	x	+	x	=	x	+
+ SAT 3 Mbit/s (S2)	=	x	+	x	+	x
+ SAT 5 Mbit/s (S3)	=	=	++	+	++	+

x Situation gegeben | = Keine Verbesserung | + Gute Verbesserung | ++ Signifikante Verbesserung

Tabelle 8.1: Verbesserung der UX beim Hinzufügen von mehr Bandbreite oder zweitem Kanal

Zusätzliche DSL-Verbindung 2 Mbit/s

Sofern beim Kunden eine DSL-Verbindung möglich wäre, würde eine markante Verbesserung der Surfing-UX, nach Abbildung 4.20, möglich sein. Die aktuelle Satelliten-Verbindung könnte weiterhin für Streaming-Inhalte genutzt werden.

Zusätzliche Satelliten-Verbindung 3 Mbit/s

Wie in Abbildung 4.20 zu sehen ist, ist die DSL-Verbindung für normales Surfen wesentlich effizienter als eine Satelliten-Verbindung. Trotzdem lohnt sich die zusätzliche Anschliessung über den Satelliten, um die Streaming-UX zu erhöhen. Zusätzlich liesse sich die ein solcher Traffic von der DSL-Verbindung lösen.

Zusätzliche Satelliten-Verbindung 5 Mbit/s

Eine signifikante Verbesserung der Streaming-UX ist hierdurch möglich. Mit 5MBit/s wäre auch eine Auslösung der Streams von 720p möglich. Dies würde einen deutlichen Unterschied, wie in Abbildung 4.21 dargestellt, bedeuten. Die Surfing-UX würde dadurch verbessert werden, da der Streaming-Inhalt über die Satelliten-Verbindung übermittelt wird.

Upgrade der Satelliten-Verbindung auf 10 MBit/s

Es wäre keine Verbesserung der Surfing-UX möglich, jedoch eine gute Verbesserung der Streaming-UX. Gleichbedeutend zu einer zusätzlichen 5 Mbit/s Satelliten-Verbindung würde das Upgrade der Verbindung einen deutlichen Unterschied, wie in Abbildung 4.21 dargestellt, in der Streaming-UX bedeuten.

9 Empfehlungen

9.1 Skripts

9.1.1 Speichern von Regeln

Um Regeln speichern zu können, muss ein Service erstellt werden, welcher die Regeln abspeichern und wiederum einlesen kann. Für diesen Zweck ist im Anhang ein Skript hinterlegt, welches einen solchen Service auf dem Router startet. Das Skript basiert dabei auf einer Anleitung, welche auf der Webseite easypi.herokuapp.com vom User kev verfasst wurde [38]. Der benötigte Service kann auch nach derselben Anleitung erstellt werden.

9.1.2 Aktualisierung von Regeln

Um Regeln effizient an einen Router zu verteilen, ergeben sich zwei Varianten:

- **Polling:** Der Router holt sich die aktuellsten Dateien in Zyklen vom Server ab. Sofern sich die Dateien von den bisherigen gespeicherten Dateien unterscheiden, werden die benötigten Schritte eingeleitet, um die Konfiguration neu einzulesen.
- **Pushing:** Der Server lädt neue Dateien aktiv auf den Router in ein bestimmtes Verzeichnis. Der Router setzt einen Filewatcher auf die Konfigurationen und sofern eine Änderung festgestellt wird, wird der Dienst mit den Konfigurationen neu eingelesen.

Bei der Polling Variante ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass der Router über eine lange Zeitdauer keine Änderungen feststellt. Trotzdem muss der Router die Datei herunterladen. Um Änderungen dennoch schnellstmöglich zu erhalten, muss das Intervall klein gehalten werden.

Im Anhang sind zwei Varianten eines solchen Polling-Skripts hinterlegt. Das Skript kann beim Startprozess ausgeführt und anschliessend mittels Cronjob in den gewünschten Zeitabständen wiederholt gestartet werden. Das eine Skript lädt die Konfiguration zuerst herunter und überprüft dann die mögliche Änderung. Das zweite Skript fragt zuerst den Server an, ob es eine Änderung gab. Hierbei geht man davon aus, dass der Server den Hash-Wert der Datei schon errechnet hat und diese Information teilt. Dadurch liesse sich der Download von den gesamten Konfigurationsdateien und der daraus resultierenden

stärkeren Nutzung des Kanals vermeiden.

Um die Möglichkeit des Pushings in Betracht ziehen zu können, müsste der Router seitens Provider direkt ansprechbar sein. Jedoch steht der Router meist hinter einem Network Address Translation (NAT), welches den direkten Zugriff nicht erlauben würde. Somit müsste ein direktes Port Forwarding bei der dazwischenliegenden Komponente eingerichtet werden.

10 Schlusswort

Im Rahmen dieser Studienarbeit haben wir uns mit den Einflüssen von Bandbreite und Round Trip Time (RTT) in Bezug auf die User Experience (UX) befasst. Dabei wurde zwischen zwei Arten von UX unterschieden. Es wurden die UXs beim Web-Surfing und beim Video-Streaming beachtet. Zudem wurde die Möglichkeit einer Dual-WAN Lösung erarbeitet, sodass der jeweils beste Verbindungskanal für die jeweilige UX genutzt werden kann.

Die Arbeit hat aufgezeigt, dass die UX beim Web-Surfing stark von der RTT abhängig ist. Eine Erhöhung der Bandbreite von 5 Mbit/s auf 10 Mbit/s würde keine Verbesserung der UX beim Web-Surfing bringen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Router konfiguriert, welcher die nötigen Entscheidungen für das Routing trifft, sodass der optimale Kanal für eine Anwendung genutzt wird. Der Router besitzt auch die Möglichkeit Unterbrüche der Internetverbindung auf einem Kanals festzustellen. Dadurch kann der Unterbruch mittels Failover auf den zweiten Anschluss umgangen werden.

Damit das Ausmass dieser Arbeit den Rahmen der Studienarbeit nicht sprengte, wurden beispielsweise die IPSets klein gehalten oder Tests mit nur einem Client auf einem Kanal durchgeführt.

11 Ausblick

Für eine kommende Arbeit könnten noch folgende Punkte betrachtet werden, welche in dieser Arbeit nicht abgedeckt wurden. Die User Experience (UX) Tests wurden nur mit einem Client durchgeführt. Dies entspricht jedoch meist der realen Nutzung eines Internetanschlusses. Mit weiteren parallellaufenden WebPageTests könnten mehr Informationen zur Auswirkung der UX gesammelt werden. Das gleiche liesse sich mit Streaming-Tests durchführen.

Zum Schluss der Arbeit wurde noch eine Unstimmigkeit mit den Domain Name System (DNS)-Antwortzeiten festgestellt. Diese Anomalie müsste noch genauer untersucht werden um Klarheit zu schaffen, warum die DNS-Auflösung so viel schneller geht als erwartet.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Rekursive DNS-Abfragekette	13
2.2	Rekursive DNS over HTTPS (DoH)-Abfrage	14
2.3	Caching-Stellen einer DNS-Abfrage	15
2.4	Aufgezeichneter Aufruf der Website www.google.com	17
4.1	Aufbau der WebPageTest-Infrastruktur	24
4.2	Aufbau der Streaming Test Infrastruktur	24
4.3	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über DSL mit 20ms Round Trip Time (RTT) . .	27
4.4	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	27
4.5	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 5 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	28
4.6	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Alle Messungen - 10 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	28
4.7	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 3 Mbit/s über DSL mit 20ms RTT	29
4.8	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	30
4.9	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 5 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	30
4.10	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (First View) - Ausgewählte Messungen - 10 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	31
4.11	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über DSL mit 20ms RTT	32
4.12	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	32
4.13	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 5 Mbit/s über Satellit mit 600ms RTT	33
4.14	figure	33
4.15	Test 3 Mbit/s über DSL-Verbindung mit 20 ms RTT	34
4.16	Test 5 Mbit/s über Satellit mit 600 ms RTT	34
4.17	Grosse Werbeeinblendung auf www.20min.ch am 15.10.2018	34

4.18	Dauer der Seitenaufrufe über Satellit auf www.20min.ch in Sekunden . . .	36
4.19	Dauer der Seitenaufrufe über Digital Subscriber Line (DSL) auf www.20min.ch in Sekunden	36
4.20	Δ der durchschnittlichen Ladezeit im Vergleich zu 3 Mbit/s DSL	37
4.21	Frame eines Videos [26] mit einer Auflösung von 480p links und 720p rechts.	38
4.22	Test 3 Mbit/s über DSL-Verbindung mit 20 ms RTT. Serie mit vermehrt hellen Szenen und somit niedrigerer Komprimierung.	39
4.23	Test 3 Mbit/s über DSL-Verbindung mit 20 ms RTT. Serie mit vermehrt dunklen Szenen und somit höherer Komprimierung.	39
5.1	Logische Verbindung zwischen logischen Interfaces und physischen Ports des Routers	41
7.1	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 3 Mbit/s über Satellit mit realer RTT	46
7.2	Korrelation Datenmenge zu Ladezeit - Document Complete (Repeat View) - Alle Messungen - 5 Mbit/s über DSL mit realer RTT	47
7.3	Peaks von der Bandbreite bei der Satelliten-Verbindung	48

Acronyme

CDN Content Delivery Network.

CSV Comma Separated Values.

DIY Do it yourself.

DNS Domain Name System.

DoH DNS over HTTPS.

DSL Digital Subscriber Line.

FQDN Fully qualified domain name.

FUP Fair use policy.

GB Gigabyte.

HTTP Hypertext Transfer Protocol.

HTTPS Hypertext Transfer Protocol Secure.

IP Internet Protocol.

ISP Internet Service Provider.

JSON JavaScript Object Notation.

LAN Local Area Network.

MAC Media Access Control.

MB Megabyte.

NAT Network Address Translation.

RTT Round Trip Time.

SLD Second Level Domain.

TLD Top Level Domain.

TTFB Time to First Byte.

TTL Time to live.

UI User Interface.

URL Uniform Ressource Locator.

UX User Experience.

VCT 100% Visually Complete Time.

VLAN Virtual LAN.

VoIP Voice over IP.

WAN Wide Area Network.

Bibliography

- [1] B. f. K. BAKOM, *Grundversorgung im fernmeldebereich*. [Online]. Available: <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/telekommunikation/grundversorgung-im-fernmeldebereich.html> (visited on 2018-10-22).
- [2] 16.3336 | *erhöhung der internet-mindestgeschwindigkeit in der grundversorgung auf 10 megabit pro sekunde | geschäft | das schweizer parlament*. [Online]. Available: <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20163336> (visited on 2018-09-14).
- [3] —, *Die comcom erteilt swisscom die grundversorgungskonzession im telekom-bereich*. [Online]. Available: <https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/medieninformationen/medienmitteilungen.msg-id-66782.html> (visited on 2018-10-22).
- [4] *Grundversorgung*. [Online]. Available: <https://www.swisscom.ch/de/privatkunden/internet-fernsehen-festnetz/festnetz/angebote/grundversorgung.html> (visited on 2018-09-14).
- [5] Swisscom, *Internet-booster*, 2016. [Online]. Available: <https://www.swisscom.ch/en/residential/internet-television-fixednetwork/internet/internet-booster.html> (visited on 2018-12-20).
- [6] J. Postel, *Rfc1591: Domain name system structure and delegation*, 2018. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc1591#section-2> (visited on 2018-12-02).
- [7] IANA, *iana — root zone database*. [Online]. Available: <https://www.iana.org/domains/root/db> (visited on 2018-11-27).
- [8] —, *iana — .ch domain delegation data*. [Online]. Available: <https://www.iana.org/domains/root/db/ch.html> (visited on 2018-11-27).
- [9] P. Mockapetris, *Rfc1035: Domain names - implementation and specification*. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc1035#section-3.2.2> (visited on 2018-11-27).
- [10] P. McManus and P. Hoffman, *Rfc8484: Dns queries over https (doh)*. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc8484> (visited on 2018-12-03).

- [11] —, *Rfc8484: Dns queries over https (doh) - on the wire*. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc8484#section-8.1> (visited on 2018-12-03).
- [12] Google, *Dns-over-https*, 2018. [Online]. Available: <https://developers.google.com/speed/public-dns/docs/dns-over-https> (visited on 2018-12-16).
- [13] P. Mockapetris, *Domain names - implementation and specification*, P. Mockapetris, Ed., 1987. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc1035.txt> (visited on 2018-10-30).
- [14] P. Meenan, *Webpagetest - website performance and optimization test*. [Online]. Available: <https://www.webpagetest.org/> (visited on 2018-10-27).
- [15] *Quick start guide - webpagetest documentation*, 2018. [Online]. Available: <https://sites.google.com/a/webpagetest.org/docs/using-webpagetest/quick-start-guide> (visited on 2018-10-27).
- [16] WPO Foundation, *Wpo-foundation/wptagent*, Patrick Meenan, Ed. [Online]. Available: <https://github.com/WPO-Foundation/wptagent/blob/master/wptagent.py#L192> (visited on 2018-12-03).
- [17] Mozilla, *Window.sessionstorage*. [Online]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Window/sessionStorage> (visited on 2018-12-03).
- [18] *Cache-control*. [Online]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Headers/Cache-Control> (visited on 2018-10-28).
- [19] *Alexa - alexa internet - about us*. [Online]. Available: <https://www.alexa.com/about> (visited on 2018-10-22).
- [20] *Top sites in switzerland - alexa*. [Online]. Available: <https://www.alexa.com/topsites/countries/CH> (visited on 2018-10-19).
- [21] *Similarweb - our data*. [Online]. Available: <https://www.similarweb.com/ourdata> (visited on 2018-10-22).
- [22] *Top websites in switzerland - similarweb website ranking*. [Online]. Available: <https://www.similarweb.com/top-websites/switzerland> (visited on 2018-10-19).
- [23] A. Technologies, "Linktropy 5500 hardware guide," [Online]. Available: <http://www.apposite-tech.com/pdfs/linktropy-5500-hwguide.pdf> (visited on 2018-12-03).
- [24] *Openwrt project: Techdata: Linksys wrt3200acm v1 (rango)*. [Online]. Available: https://openwrt.org/toh/hwdata/linksys/linksys_wrt3200acm (visited on 2018-10-22).
- [25] Ilya Grigorik and Surma, *Introduction to http/2 | web fundamentals | google developers*, 2018. [Online]. Available: <https://developers.google.com/web/fundamentals/performance/http2/> (visited on 2018-12-16).

- [26] *Big buck bunny 60fps 4k - official blender foundation short film - youtube*. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=aqz-KE-bpKQ> (visited on 2018-12-15).
- [27] Netflix, *Netflix system requirements for html5 player and silverlight*, 2018. [Online]. Available: <https://help.netflix.com/en/node/23742> (visited on 2018-12-15).
- [28] YouTube, *Youtube*, 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/testtube> (visited on 2018-12-03).
- [29] Alliance for open media, *Home*. [Online]. Available: <https://aomedia.org/> (visited on 2018-12-02).
- [30] —, *Av1 features*. [Online]. Available: <https://aomedia.org/av1-features/> (visited on 2018-12-02).
- [31] —, *License*. [Online]. Available: <https://aomedia.org/license/> (visited on 2018-12-02).
- [32] Swisscom, *Angebotsbedingungen: Swisscom line basic wireless/sat*. [Online]. Available: <https://www.swisscom.ch/content/dam/swisscom/de/res/public/tv-internet-festnetz/festnetz/angebotsbedingungennewgvde10-10-16.pdf>.
- [33] Cisco Systems, Inc., *Troubleshooting and debugging voip call basics: Understand voip quality of service (qos) issues*, 2005. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/h323/14081-voip-debugcalls.html#qualofservice> (visited on 2018-12-02).
- [34] OpenWrt, *Openwrt project: Package: Dnsmasq-full*. [Online]. Available: <https://openwrt.org/packages/pkgdata/dnsmasq-full> (visited on 2018-12-18).
- [35] —, *Openwrt project: Package: Luci-app-mwan3*. [Online]. Available: <https://openwrt.org/packages/pkgdata/luci-app-mwan3> (visited on 2018-12-18).
- [36] OpenWrtOpenWrt, *Openwrt project: Mwan3 (use multiple wan connections together)*. [Online]. Available: https://openwrt.org/docs/guide-user/network/wan/multiwan/mwan3#rule_configuration (visited on 2018-12-18).
- [37] Swisscom, *Swisscom digitalisiert 240 alpbetriebe | swisscom aktuell*, 2018. [Online]. Available: <https://www.swisscom.ch/de/about/medien/aktuell/all-ip-fuer-alpbetriebe-beispiel-oberchaeseren.html> (visited on 2018-12-10).
- [38] kev, *Setup ipset on openwrt*, kev, Ed., 2016. [Online]. Available: <https://easypi.herokuapp.com/setup-ipset-on-openwrt/> (visited on 2018-12-18).

Anhänge

In der abgegebenen ZIP-Datei finden sich folgende Dokumente:

- Semesterarbeit.pdf
- Abstract.txt
- Aufgabenstellung_Dual-WAN_UX.pdf
- Einverständniserklärung.pdf
- Erklärung_zur_Urheberschaft.pdf
- Kontaktadressen.txt
- Passwörter.txt
- Persönliche_Berichte.pdf
- Vereinbarung_zur_Verwendung_und>Weiterentwicklung_der_Arbeit.pdf
- Sitzungsprotokolle.zip
- Skripte
 - configPoller1.sh
 - configPoller2.sh